

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه کنترل

شناسایی موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند با استفاده از حسگرهای

مغناطیسی به عنوان اندازه‌گیر

دانشجو: مه‌ری خیری فرد

اساتید راهنما:

حیدر طوسی‌ان شاندیز

اصغر صدیق زاده

استاد مشاور:

حسین رسولی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار: بهمن ۱۳۹۰

پیوست ۰۲

## تقدیم به:

## پدر و مادر

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش کنم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. عزیزانی که راه رفتن در این وادی پر فراز زندگی را به من آموختند. آنها که سالها رنج و سختی را به امید شکوفایی گلهای زندگی‌شان به جان خریدند و سعادت و کمال مرا آرزو کردند. آنان که عمر ارزشمندشان با عشق به فرزندان می‌گذرد و مظهر ایثار، عشق، صبر و شکیبایی هستند. و آنان که هرگز جبران فداکاری‌شان ممکن نیست.

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان...

## تشر و قدردانی

سپاس خدای را که نهایت توفیق را نصیب این بنده کوچکترین نمود تا غنای وجود خویش را در دانش اندوزی جستجو نمایم. بی تردید، دست یاری آن دادار هستی اگر نبود، این کمترین را یارای به پایان بردن این راه طولانی و سخت نبود.

آنچه پیش رو دارید حاصل عمر شریفترین انسانهایی است از پدر، مادر و خانواده عزیزم و معلمین تا اساتید بزرگوار دانشگاه، که امروز بر دوش نهال کوچکی چون این کمترین، به بار نشست است. پس به پاس این همه بزرگواری، تلاش و رنج، بر خود می دانم تا:

از راهنماییهای استاد راهنمای فرزانه ام جناب آقای دکتر حیدر طوسیان شاندیز و از شفقت، کرامت و راهنماییهای ارزنده استاد راهنمای فرزانه و شایسته ام جناب آقای دکتر اصغر صدیقزاده و استاد مشاور عزیزم جناب آقای مهندس حسین رسولی در این راه بی پایان با تمام وجود سپاسگزاری می نمایم و از خداوند بزرگ پاداش دانشمندان دیندار را برای ایشان خواستارم.

با تقدیر از آقای مهندس چاپار رسولی که در گام به گام این پایان نامه با شکیبایی، بزرگواری و محبت های بی دریغ خود موانع موجود در مسیر را هموار ساخته و اینجانب از تحلیل و یاری علمی ایشان و آقای دکتر علیرضا فاتحی بهره های وصف ناشدنی برده ام تا آنجا که این قلم و زبان، از قدردانی این عزیزان نهایت عجز را دارد. با این قلم شکسته و با دلی سرشار از محبت و کرامت او، از زحمتهای بی شائبه ای این عزیزان از ژرفای جان قدردانی می نمایم.

از همکاری، همدلی و یاری مشفقانه دوستان و همکارانم که حقیقتاً در مدت انجام پروژه شکیبایی ورزیدند و این کمترین را با بزرگترین خویش کامروا نمودند، صمیمانه و فروتنانه قدردانی می کنم. امید آنکه آنچه دادار هستی به دعا، یاری و تلاش بزرگواران یاد شده در این سینه به امانت و یادگار سپرده است، چراغ راه زندگی خویش گردانم و خود او نیز توفیق پاسداری از آن، از گزند نابخردان و سیاستان روزگار عنایت فرماید تا امانتداری نیکاندیش باشم.

با احترام و سپاس

مهری خیری فرد

بهمن ماه ۱۳۹۰

تعهد نامه:

## چکیده

حرکت عمودی ستون پلازما در توکامک ذاتاً ناپایدار است که این ناپایداری موجب برخورد آن با دیواره محفظه و از هم گسیختگی آن می‌شود. بنابراین باید سیستم کنترلی با ایجاد میدان‌های مغناطیسی متغیر، نیروی لازم جهت کنترل پلازما را فراهم سازد.

در این پایان‌نامه برای افزایش دقت، سیستم کنترل مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند، به طور مستقیم موقعیت عمودی پلازما را کنترل می‌کند. برای این که بتوانیم این سیستم کنترل را راه‌اندازی کنیم مدارات لازم، طراحی و ساخته شده است.

برای تحلیل میدان‌های قطبی به منظور محاسبه مکان پلازما و شناخت عوامل فیزیکی مؤثر برای تهیه مدل مناسب از مکان عمودی سیستم، باید محل دقیق حسگرها مشخص می‌گردید. با اندازه‌گیری‌های انجام شده، نقشه صحیح تهیه شد. در ادامه برای تحلیل میدان‌های قطبی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مغناطیسی، با طراحی و انجام آزمایشی ضریب کالیبره حسگرهای مغناطیسی تعیین گردید.

برای تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی، داشتن یک مدل ریاضی از دستگاه که بتواند دینامیک سیستم را حتی‌الامکان بطور کامل توصیف کند، ضروری است. برای تهیه مدل دینامیکی از مکان عمودی پلازما در توکامک بر آن شدیم که با استفاده از داده‌های تجربی و بکارگیری تکنیک شناسایی سیستم، مدل پیش‌بین و مدل شبیه‌ساز غیرخطی برای مکان عمودی پلازما طراحی کنیم.

مدل پیش‌بین با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه، با ساختار خود همبسته غیرخطی با ورودی اضافه و آموزش به روش لونبرگ مارکوات تهیه گردید که نتایج حاصل از مقایسه داده‌های تجربی و نتایج مدل نشان‌دهنده اعتبار خوبی از مدل است. پس از آن مدل شبیه‌ساز با استفاده از شبکه پرسپترون چند لایه، با ساختار خطای خروجی غیر خطی و آموزش به روش لونبرگ

مارکوات بدست می‌آید که با مقایسه نتایج حاصل از مدل و داده‌های تجربی این نتیجه حاصل می‌شود که مدل از اعتبار خوبی برخوردار است. در پایان نتایج حاصل از مدل‌سازی با کارهای قبلی انجام شده در این زمینه مقایسه گردید که نشان‌گر بهبود مدل‌سازی در این پروژه می‌باشد.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

[۱] مهری خیری فرد، اصغر صدیق زاده، حسین رسولی، چاپار رسولی، بنفشه پورشهاب، " تعیین ضرایب کالیبراسیون حسگرهای میدان مغناطیسی قطبی در توکامک دماوند"، هجدهمین کنفرانس هسته ای ایران ، یزد، اسفند ۱۳۹۰.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ش	فهرست جدول ها
ص	فهرست شکل ها
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۵	۲-۱- کارهای انجام شده:
۷	۳-۱- مروری بر ساختار پایان نامه
۸	فصل دوم: مقدمه ای بر گداخت هسته ای و روش های محصورسازی پلاسما
۹	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- انرژی همجوشی هسته ای
۱۲	۳-۲- پلاسما
۱۴	۱-۳-۲ ویژگی های فیزیکی پلاسما
۱۴	۲-۳-۲ جریان الکتریکی در پلاسما
۱۵	۳-۳-۲ رفتار پلاسما در میدان مغناطیسی
۱۵	۴-۲- شرایط ایجاد گداخت هسته ای
۱۵	۱-۴-۲ شرط اشتعال
۱۶	۲-۴-۲ معیار لاوسون
۱۷	۵-۲- محصورسازی پلاسما
۱۷	۱-۵-۲ روش های محصورسازی پلاسما
۲۰	فصل سوم: توکامک دماوند و سیستم های کنترل مکان عمودی پلاسما در آن
۲۱	۱-۳- مقدمه
۲۲	۲-۳- دستگاه توکامک
۲۴	۳-۳- توکامک دماوند
۲۸	۴-۳- سیستم های کنترل موقعیت پلاسما در توکامک دماوند:
۲۹	۱-۴-۳ سیستم کنترل حلقه باز جابجایی عمودی پلاسما

۲۹	۳-۴-۱-۱- کنترل غیرفعال.....
۳۱	۳-۴-۱-۲- کنترل کننده حلقه باز برنامه ریزی شده.....
۳۲	۳-۴-۲- سیستم کنترل حلقه بسته جابجایی عمودی پلاسما.....
۳۳	۳-۴-۳- روش های اندازه گیری مکان پلاسما در توکامک.....
۳۴	۳-۴-۱- استفاده از حسگرهای حلقه زینی.....
۳۵	۳-۴-۲- استفاده از حسگرهای مغناطیسی.....
۳۸	فصل چهارم: بهبود سیستم اندازه گیر و کنترل موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند.....
۳۹	۴-۱- مقدمه: ..
۳۹	۴-۲- طراحی و ساخت مدار اندازه گیر مکان عمودی پلاسما و کنترل کننده PD.....
۴۵	۴-۳- استفاده از حسگرهای مغناطیسی.....
۴۷	۴-۴- تعیین محل حسگرهای مغناطیسی.....
۶۰	۴-۵- محاسبه ضریب کالیبراسیون حسگرهای مغناطیسی.....
۶۹	فصل پنجم: شناسایی و مدل سازی موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند.....
۷۰	۵-۱- مقدمه.....
۷۳	۵-۲- روش های مختلف شناسایی یک فرایند.....
۷۴	۵-۲-۱- دیدگاه های مختلف در مورد شناسایی حلقه بسته.....
۷۵	۵-۲-۲- مراحل شناسایی یک فرایند.....
۷۶	۵-۳- مراحل شناسایی موقعیت عمودی پلاسما بر اساس داده های حسگرهای مغناطیسی.....
۷۶	۵-۳-۱- طراحی و انجام آزمایش.....
۸۲	۵-۳-۲- پردازش اولیه داده ها.....
۸۸	۵-۳-۳- انتخاب ساختار مدل.....
۸۹	۵-۳-۴- تخمین پارامترها و تعیین اعتبار مدل.....
۹۰	شبکه های عصبی MLP.....
۹۴	۵-۴- ساختار مدل پیش بین جابجایی عمودی پلاسما در توکامک دماوند بر اساس حسگرهای مغناطیسی (MP).....
۹۵	۵-۴-۱- تخمین تأخیر ورودیهای شبکه.....
۹۷	۵-۴-۲- انتخاب شات های مناسب و ترکیب آن ها برای آموزش شبکه.....

۵-۴-۳- نتایج مدل پیش بین جابجایی عمودی پلاسما در حالت حلقه بسته با حسگرهای

MP.....۹۹

۵-۵-۵- مدل شبیه‌ساز مکان عمودی پلاسما در توکامک .....۱۰۵

۵-۵-۱- ساختار مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما .....۱۰۵

۵-۵-۲- مدل پیش بین خروجی حسگرهای مغناطیسی .....۱۰۷

۵-۵-۳- مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما .....۱۱۱

نتیجه‌گیری.....۱۱۵

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....۱۱۷

۶-۱- جمع بندی و نتیجه‌گیری: .....۱۱۸

۶-۲- پیشنهادات .....۱۲۰

فهرست مراجع .....۱۲۱

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

---

جدول ۱-۳: پارامترهای اصلی توکامک دماوند.....	۲۶
جدول ۲-۳: میزان شارژ بانک های خازنی توکامک دماوند و تاخیر زمانی آن ها در این پروژه.....	۲۷
جدول ۱-۴: شماره حسگرهای مغناطیسی و انتگرال گیرهای مربوطه.....	۴۹
جدول ۲-۴: مقادیر مختصات محل قرارگیری حسگرهای مغناطیسی شماره ۱ تا ۲۴ بر حسب سانتیمتر.....	۵۸
جدول ۳-۴: مقادیر مختصات محل قرارگیری حسگرهای مغناطیسی شماره ۲۵ تا ۴۸ بر حسب سانتی متر.....	۵۹
جدول ۴-۴: مقدارهای ضریب کالیبراسیون حسگرهای مغناطیسی در شرایط مختلف آزمایش.....	۶۲
جدول ۵-۴: مقدارهای ضریب کالیبراسیون با گین های مختلف تقویت کننده.....	۶۶
جدول ۱-۵: مقایسه نتایج مدل پیش بین $Z_p$ برای ۳ بردار ورودی متفاوت.....	۱۰۵
جدول ۲-۵: مشخصات شبکه بهینه برای مدل پیش بین خروجی حسگرهای مغناطیسی.....	۱۱۰
جدول ۳-۵: مشخصات شبکه بهینه برای مدل شبیه ساز جابجایی عمودی پلاسما.....	۱۱۳

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲: واکنش هسته ای دوتریم و تریتیوم ..... ۱۱
- شکل ۲-۲: حالت های ماده که در اثر انرژی جنبشی بالا، پلاسمای یونیزه شده حاصل می شود. ۱۳
- شکل ۳-۲: محصورسازی مغناطیسی ذرات یونیزه شده در پلاσμα ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: مقایسه نموداری شرط اشتعال (منحنی A) و معیار لاوسون (منحنی B) ..... ۱۶
- شکل ۵-۲: شمایی از اولین دستگاه های چنبرهای ..... ۱۹
- شکل ۱-۳: شماتیکی از سیستم توکامک ..... ۲۲
- شکل ۲-۳: نحوه تشکیل میدان برآیند جهت محصورسازی پلاσμα ..... ۲۳
- شکل ۳-۳: نمایی از توکامک دماوند ..... ۲۵
- شکل ۴-۳: سطح مقطع توکامک دماوند ..... ۲۵
- شکل ۵-۳: نمودار جریان پلاσμα ..... ۲۸
- شکل ۶-۳: نمودار مکان عمودی پلاσμα ( $Z_p$ ) ..... ۲۹
- شکل ۷-۳: شمای کلی از حلقه های کنترلی غیرفعال ..... ۳۰
- شکل ۸-۳: نمایش کنترل فعال ..... ۳۲
- شکل ۹-۳: بلوک دیاگرام سیستم کنترل حلقه بسته مکان عمودی پلاσμα با استفاده از کنترل کننده PD ..... ۳۳
- شکل ۱۰-۳: جابجایی افقی و عمودی پلاσμα در توکامک با سطح مقطع D شکل ..... ۳۴
- شکل ۱۱-۳: نحوه قرارگرفتن حلقه های زینی در توکامک دماوند ..... ۳۵
- شکل ۱-۴: شماتیک مدار تقسیم کننده شار میدان ( $\Psi_Z$ ) بر جریان پلاσμα ..... ۴۰
- شکل ۲-۴: مدار مربوط به تقسیم کننده آی سی AD530 ..... ۴۰
- شکل ۳-۴: شماتیک مدار محاسبه کننده خطای بین  $Z_p$  و  $Z_{ref}$  ..... ۴۲
- شکل ۴-۴: شماتیک مدار کنترل کننده PD ..... ۴۲
- شکل ۵-۴: شماتیک کلی مدار اندازه گیر مکان عمودی پلاσμα و کنترل کننده PD ..... ۴۳
- شکل ۶-۴: PCB مدار اندازه گیر مکان عمودی پلاσμα و کنترل کننده PD ..... ۴۴
- شکل ۷-۴: تصویر برد مونتاژ شده مدار اندازه گیر مکان عمودی پلاσμα و کنترل کننده PD ..... ۴۵
- شکل ۸-۴: یافتن موقعیت عمودی با استفاده از دو حسگر مغناطیسی ..... ۴۶

- شکل ۴-۹: نقشه قدیم نحوه قرار گرفتن حسگرهای مغناطیسی در توکامک دماوند..... ۴۸
- شکل ۴-۱۰: تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera برای میلی ثانیه اول تا ششم تشکیل پلازما..... ۵۰
- شکل ۴-۱۱: تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera برای میلی ثانیه هفتم تا پانزدهم تشکیل پلازما..... ۵۱
- شکل ۴-۱۲: تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera برای میلی ثانیه شانزدهم تا بیست و یکم تشکیل پلازما..... ۵۲
- شکل ۴-۱۳: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۱۸ms بعد از تشکیل پلازما..... ۵۳
- شکل ۴-۱۴: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۱۹ms بعد از تشکیل پلازما..... ۵۳
- شکل ۴-۱۵: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۲۰ms بعد از تشکیل پلازما..... ۵۳
- شکل ۴-۱۶: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۲۱ms بعد از تشکیل پلازما..... ۵۴
- شکل ۴-۱۷: مقادیر حسگرهای شماره ۴۳ و ۷..... ۵۴
- شکل ۴-۱۸: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۴ms بعد از تشکیل پلازما..... ۵۵
- شکل ۴-۱۹: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۱۴ms بعد از تشکیل پلازما..... ۵۵
- شکل ۴-۲۰: نمودار جریان و مکان عمودی پلازما..... ۵۵
- شکل ۴-۲۱: مقادیر حسگرهای شماره ۴۳ و ۷..... ۵۶
- شکل ۴-۲۲: مقادیر حسگرهای شماره ۴۳ و ۷..... ۵۶
- شکل ۴-۲۳: تصویر نیمه بالایی کانال های قرارگیری حسگرهای مغناطیسی در داخل توکامک دماوند..... ۵۶
- شکل ۴-۲۴: نقشه اصلاح شده نحوه قرار گرفتن حسگرهای مغناطیسی در توکامک دماوند..... ۵۷
- شکل ۴-۲۵: مدار طراحی شده به منظور محاسبه ضریب کالیبراسیون سنسورهای مغناطیسی..... ۶۱
- شکل ۴-۲۶: نمودار جریان گذرنده از سیملوله..... ۶۳
- شکل ۴-۲۷: نمودار ولتاژ خروجی حسگرهای مغناطیسی..... ۶۳
- شکل ۴-۲۸: نمودار میدان ایجاد شده در مرکز سیملوله..... ۶۴
- شکل ۴-۲۹: (a) نمودار میدان بر حسب ولتاژ خروجی سیملوله..... ۶۴
- شکل ۴-۳۰: نمودار جریان گذرنده از سیملوله..... ۶۴
- شکل ۴-۳۱: نمودار ولتاژ خروجی حسگرهای مغناطیسی..... ۶۵
- شکل ۴-۳۲: نمودار میدان ایجاد شده در مرکز سیملوله..... ۶۵

- شکل ۴-۳۳: a) نمودار میدان برحسب ولتاژ خروجی سیملوله ..... ۶۵
- شکل ۴-۳۴: نمودار ضریب کالیبراسیون ( $\frac{K}{5}$ ) بعد از در نظر گرفتن مسائل آماری ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۵: نمودار جریان پلاسما ..... ۶۷
- شکل ۴-۳۶: نمودار میدان پلوئیدالی در مکان قرارگیری حسگرهای ۱۳ و ۳۶ ..... ۶۷
- شکل ۵-۱: بلوک دیاگرام مربوط به نحوه شناسایی روی خط ..... ۷۳
- شکل ۵-۲: بلوک دیاگرام مربوط به شناسایی غیرمستقیم ..... ۷۴
- شکل ۵-۳: بلوک دیاگرام مربوط به شناسایی به روش مستقیم ..... ۷۵
- شکل ۵-۴: بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلاسما در توکامک دماوند ..... ۷۶
- شکل ۵-۵: داده های مربوط به شات ۲۷ در حالت حلقه بسته ..... ۷۷
- شکل ۵-۶: داده های مربوط به شات ۲۷ در حالت حلقه بسته ..... ۷۹
- شکل ۵-۷: داده های مربوط به شات ۲۰ در حالت حلقه بسته ..... ۸۰
- شکل ۵-۸: داده های مربوط به شات ۱۳ در حالت حلقه بسته ..... ۸۱
- شکل ۵-۹: اجرای برنامه پیش پردازش برای فیلتر، حذف offset، انتخاب محدوده زمانی و کاهش نمونه برداری ..... ۸۴
- شکل ۵-۱۰: داده های پیش پردازش شده مربوط به شات ۲۷ در حالت حلقه بسته ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۱: داده های پیش پردازش شده مربوط به شات ۲۰ در حالت حلقه بسته ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۲: داده های پیش پردازش شده مربوط به شات ۱۳ در حالت حلقه بسته ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۳: ساختار یک شبکه با آموزش BP ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۴: شبکه عصبی MLP مورد نظر در شناسایی مکان عمودی پلاسما ..... ۹۲
- شکل ۵-۱۵: بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلاسما به همراه ساختار تهیه مدل پیش بین Plant در توکامک دماوند ..... ۹۴
- شکل ۵-۱۶: ساختار NARX مدل پیش بین در شناسایی جابجایی عمودی پلاسما ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۷: نمودار تحلیل همبستگی به ترتیب برای داده های تست شماره ۲۱ و ۲۷ ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸: نمونه ای از ترکیب شاتها برای تهیه مدل پیش بین و شبیه ساز ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۹: منحنی تغییرات MSE خطای داده های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش برای بردار ورودی اول ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۲۰: منحنی تغییرات MSE خطای داده های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش برای بردار ورودی دوم ..... ۱۰۲



شکل ۵-۲۱: منحنی تغییرات MSE خطای داده های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش برای بردار ورودی سوم..... ۱۰۲

شکل ۵-۲۲: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش بین  $Z_P$  با بردار ورودی اول، ۱۵ نرون و ۳۸۲ بار آموزش..... ۱۰۲

شکل ۵-۲۳: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش بین  $Z_P$  با بردار ورودی دوم، ۱۱ نرون و ۳۸۰ بار آموزش..... ۱۰۲

شکل ۵-۲۴: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش بین  $Z_P$  با بردار ورودی سوم، ۱۰ نرون و ۵۳۶ بار آموزش..... ۱۰۳

شکل ۵-۲۵: شکل موج خطای داده های آموزش و تست مدل پیش بین  $Z_P$  با بردار ورودی اول..... ۱۰۴

شکل ۵-۲۶: شکل موج خطای داده های آموزش و تست مدل پیش بین  $Z_P$  با بردار ورودی دوم..... ۱۰۴

شکل ۵-۲۷: شکل موج خطای داده های آموزش و تست مدل پیش بین  $Z_P$  با بردار ورودی سوم..... ۱۰۵

شکل ۵-۲۸: بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلاسما به همراه ساختار تهیه مدل شبیه ساز Plant در توکامک دماوند..... ۱۰۶

شکل ۵-۲۹: ساختار مدل شبیه ساز در شناسایی جابجایی عمودی پلاسما..... ۱۰۷

شکل ۵-۳۰: منحنی تغییرات MSE خطای داده های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش..... ۱۰۹

شکل ۵-۳۱: منحنی تغییرات MSE خطای داده های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش..... ۱۰۹

شکل ۵-۳۲: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۳ برای شات های ۲۰ و ۲۸..... ۱۱۰

شکل ۵-۳۳: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۲۵ برای شات های ۲۰ و ۲۸..... ۱۱۱

شکل ۵-۳۴: سیگنال خطای داده های آموزش و تست مدل پیش بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۳..... ۱۱۱

شکل ۵-۳۵: سیگنال خطای داده های آموزش و تست مدل پیش بین خروجی حسگر مغناطیسی  
شماره ۲۵..... ۱۱۱

شکل ۵-۳۶: منحنی تغییرات MSE خطای داده های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون های  
لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش ..... ۱۱۳

شکل ۵-۳۷: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل شبیه ساز جابجایی عمودی پلاسما..... ۱۱۴

شکل ۵-۳۸: سیگنال خطای داده های آموزش و تست مدل شبیه ساز جابجایی عمودی پلاسما  
..... ۱۱۴

فصل ۱ -

## فصل اول:

مقدمه

## ۱ + مقدمه

بشر برای تأمین بسیاری از احتیاجات اولیه خود نیازمند مصرف انرژی می‌باشد، از طرفی جمعیت کره زمین دائماً افزایش می‌یابد و مصرف سرانه انرژی در حال رشد است. بنابراین باید به دنبال منابع انرژی غنی بود.

زمانی چوب و سوخت‌هایی مانند کود حیوانی و ضایعات کشاورزی تنها منابع اصلی انرژی بودند و حتی تا به امروز نیز در بعضی از ممالک در حال توسعه جایگاه خود را حفظ کرده‌اند. بهره‌برداری از ذغال سنگ انقلاب صنعتی را در اروپا و آمریکا آغاز کرد و نفت و گاز امروزه پایه زندگی ما را می‌سازند ولی در زمانی نه چندان دور ذخایر نفت، گاز و زغال سنگ همگی به اتمام می‌رسند، به‌علاوه آثار تخریب‌گرانه گلخانه‌ای و زیست محیطی ناشی از استفاده این نوع انرژی‌ها هم‌اکنون مشخص می‌باشد. از طرفی منابع دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد و خورشید و غیره به علت محدودیت مقدار نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای روزافزون صنعت باشد. [۱]

چشمه‌های انرژی حاصل از واکنش شکافت هسته‌ای هم با توجه به مزایایی چون ارزان بودن سوخت و ایجاد انرژی زیاد، به علت پسماند حاصل از واکنش شکافت منبع انرژی قابل قبولی نیست. بنابراین یکی از گزینه‌های مناسب بشر برای تأمین انرژی مورد نیاز خود استفاده از انرژی گداخت هسته‌ای می‌باشد [۲].

در آغاز قرن بیستم هیچ توضیح قانع کننده‌ای برای مقدار عظیم انرژی تابش شده به وسیله خورشید وجود نداشت تا اینکه در سال ۱۹۲۰ ادینگتون نتیجه‌گیری نمود که گداخت محتمل‌ترین منبع انرژی خورشید می‌باشد و پس از آن نیز با بسط نظریه کوانتومی ارائه یک توضیح مستدل ممکن شد [۱].

چنین به نظر می‌رسد که به کارگیری انرژی حرارتی هسته‌ای از طریق ساخت راکتورهای گداخت راه حل مناسبی برای مسئله بحران انرژی آینده می‌باشد. در گداخت از این خاصیت مهم

فیزیکی استفاده شده است که وقتی هسته‌های سبک (مثلاً هسته ایزوتوپ‌های هیدروژن) با هم ترکیب شوند، انرژی تولید می‌شود که به صورت انرژی جنبشی و حرارت قابل استفاده خواهد بود. در حقیقت این انرژی نه تنها جوابگوی نیاز روز افزون بشر خواهد بود بلکه در مقایسه با سوخت‌های دیگر مانند زغال‌سنگ، نفت، گاز و اورانیوم (برای شکافت هسته‌ای) هزینه بسیار کمتری در تولید دارد. تولید و کاربرد آن اثرات بدی در محیط زیست ایجاد نمی‌کند و سوخت آن به آسانی در بسیاری از مناطق جهان در دسترس است (در آب دریاها و اقیانوس‌ها) [۳] و از دیگر مزایای آن به عدم حضور محصولات پسماند، ایمنی ذاتی در مقابل انفجارات هسته‌ای، پایین بودن خطرات بیولوژیکی و کاهش خطر گستردگی موارد تسلیحاتی برای مقاصد نظامی نیز می‌توان اشاره نمود [۴].

البته ممکن است ایجاد انرژی به وسیله گداخت به دلیل مسائل مورد سوال در ارتباط با چگونگی استفاده از آن و اشکالات فراوانی که در برابر عملی شدن آن موجود است، کمی مبهم باشد. اما از سویی با در نظر گرفتن اهمیت و توان نهفته در گداخت اگر در جستجوی تولید انرژی حاصل از آن نباشیم از دید نسل‌های آینده کم‌کاری غیر قابل جبرانی مرتکب شده‌ایم که نابخشودنی می‌باشد. همانطور که می‌دانیم بیشتر جهان را حالت چهارم ماده که پلازما نامیده می‌شود، فرا گرفته است. تمامی ستارگان از جمله خورشید که انرژی گسیلی از آن‌ها منشأ هسته‌ای دارد از ماده در حالت پلازما تشکیل شده‌اند و انرژی آن‌ها در اثر واکنش‌های هسته‌ای درون آن‌ها در محیط پلازما بوجود می‌آید.

با توجه به مسائل ذکر شده عجیب نیست که چندین سال است کشورهای مختلفی در دنیا مشغول تحقیق در زمینه تولید انرژی از واکنش‌های هسته‌ای گداخت باشند و در این راستا به دنبال ایجاد محیط پلازما و کنترل و نگهداری آن، افزایش دما و ... بطوری که ایجاد واکنش‌های هسته‌ای امکان‌پذیر باشد و در نهایت رسیدن به بهره انرژی مثبت می‌باشند، ولی راه تا مهار کردن این انرژی نسبتاً طولانی است.

انتظار می‌رفت که تا پایان قرن، بتوان از انرژی حاصل از گداخت برای تولید برق استفاده کرد، اما به دلیل شرایط دشوار واکنش گداخت هسته‌ای این امر امکان‌پذیر نشد. در قرن گذشته دستگاه‌های بسیاری جهت تولید انرژی از گداخت کنترل شده مورد آزمایش قرار گرفتند که در این میان ماشین توکامک موفق‌ترین روش دستیابی به گداخت هسته‌ای بوده است. توکامک دستگاه چنبره‌ای محصورسازی پلاسماست که در آن پلازما توسط میدان‌های مغناطیسی مختلف محصور می‌شود و به منظور برقراری تعادل میان فشار پلازما و نیروهای مغناطیسی از میدان قطبی نیز استفاده می‌شود که این میدان در اثر جریان القایی ایجاد شده توسط خود پلازما تولید می‌شود. راکتور بین‌المللی گداخت هسته‌ای ایترا<sup>۱</sup> نیز از جمله پروژه‌هایی است که با سرمایه‌گذاری بسیار بالا به طور مشترک توسط کشورهای کانادا، ژاپن، روسیه، فرانسه، آمریکا و دانشمندی از اتحادیه اروپا در حال انجام است. هدف از انجام این پروژه تولید الکتروسیسته از طریق واکنش همجوشی است. بر اساس تصمیم‌گیری کشورهای درگیر در این پروژه، کشور فرانسه به عنوان محل احداث چنین نیروگاهی انتخاب شده است [۴].

توازن داخلی میان فشار پلازما و نیروهای حاصل از میدان مغناطیسی و همچنین مفهوم شکل و مکان پلازما که بوسیله جریان سیم‌پیچ‌های خارجی و اعمال میدان، قابل کنترل هستند از مفاهیم اصلی مورد توجه برای تعادل توکامک هستند [۵].

به منظور ایجاد شرایط لازم برای واکنش‌های گداخت هسته‌ای و تولید انرژی از آن، باید یک سوخت گرما هسته‌ای تا حدود دمای ۱۰۰ میلیون درجه سانتی‌گراد گرم شده و همزمان چگالی سوخت نیز برای زمان زیادی بالا نگه داشته شود، از طرفی پلازما در اثر کوچک‌ترین برخورد با بدنه، از بین خواهد رفت بنابراین باید مکان ستون پلازما از مرکز محفظه کمترین جابجایی را داشته باشد که برای رسیدن به این هدف از پیچ‌های چهارقطبی در داخل چنبره به عنوان

کنترل‌کننده غیرفعال و پیچیده‌های قطبی خارجی در بیرون چنبره به عنوان کنترل‌کننده فعال استفاده می‌شود [۶]، [۷].

اساساً برای تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی داشتن یک مدل ریاضی از دستگاه که بتواند دینامیک سیستم را تا حد امکان کامل توصیف کند، ضروری می‌باشد.

با توجه به ویژگی‌های ذاتی پلاسما از سویی تابع قوانین الکترومغناطیس است و از سوی دیگر از معادلات سیالی پیروی می‌کند که این امر پیچیدگی مدل‌سازی و مطالعه فیزیکی را به دنبال دارد. اصولاً برای بدست آوردن یک مدل ریاضی از دستگاه دو شیوه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش اول معادلات ریاضی سیستم را براساس قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم بدست آورده و بر پایه آن مدل مناسبی برای سیستم بدست می‌آوریم و در روش دوم با داشتن ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم با کمک تکنیک‌های شناسایی یک ساختار مناسب برای مدل در نظر گرفته و پارامترهای مجهول را بدست آورده و بر پایه آن مدل سیستم به دست می‌آید. در حالت کلی در بسیاری موارد (همچون دینامیک حرکت و شکل پلاسما)، به دلیل پیچیدگی بیش از حد فرآیند تنها با استفاده از قوانین فیزیکی نمی‌توان مدل مناسبی را ارائه داد و از طرفی ممکن است شناسایی به تنهایی امکان پذیر نباشد بنابراین ضروری است از ترکیب دو روش استفاده گردد به این صورت که بعضی از پارامترهای سیستم به کمک قوانین فیزیکی و برخی دیگر با روش‌های شناسایی سیستم تعیین شوند [۸].

## ۱ ۴- کارهای انجام شده

در مواردی مدل‌های فیزیکی مناسبی برای شکل و مکان پلاسما بدست آمده که می‌توان به مدل‌های مربوط به توکامک‌های دی تری-دی<sup>۱</sup> و تی سی وی<sup>۲</sup> اشاره کرد [۹]، [۱۰].

---

1-DIII-D  
2-TCV

همچنین در توکامک توسکا<sup>۱</sup> و اچ تی هفت<sup>۲</sup> روابطی برای تخمین شکل و موقعیت پلاسما با استفاده از روابط خطی از فوریه میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده توسط سیم‌پیچ‌های خاص بدست آمده است [۱۱]، [۱۲].

جابجایی پلاسما در توکامک، غیرخطی و وابسته به زمان می‌باشد. با توجه به حاکم بودن معادلات نیروهای الکترومغناطیسی بر توکامک و معادلات و شرایط متغیر حاکم بر پلاسما، معادلات دینامیکی سیستم در حضور پلاسما بسیار پیچیده می‌باشد که تا کنون به صورت دقیق بدست نیامده است و در صورت لزوم از بسیاری از پارامترهای موجود صرف‌نظر شده و از تقریب این معادلات استفاده می‌شود که همین موضوع مشکلات زیادی را در طراحی سیستم‌های کنترل ایجاد می‌کند.

در سال‌های اخیر برای تحلیل دینامیک غیرخطی پلاسما از روش‌های پیشرفته‌تری مانند: شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی و یا ترکیب این موارد استفاده شده است [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶].

به دلیل ساختار غیرخطی و توانایی یادگیری شبکه عصبی، از آن برای شناسایی و تخمین مکان و شکل پلاسما در توکامک‌های مختلف استفاده شده است که در ادامه چند نمونه از کارهای انجام شده به صورت نمونه آورده شده است.

پراگ وی یاس<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۶ با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم و با بکارگیری شبکه عصبی مدل دینامیکی موقعیت عمودی پلاسما در توکامک کامپس دی<sup>۴</sup> را شناسایی نمود [۱۷].  
همچنین در توکامک آزدکس آپگریت<sup>۵</sup> با استفاده از شبکه عصبی تعداد حسگرهای مهم برای تخمین پارامترهای مختلف پلاسما را بدست آوردند [۱۸].

---

1-Tosca  
2-HT-7  
3-Parag Vyas  
4-Compass-D  
5-Asdex Upgrade



رسولی در سال ۱۳۸۷ (ه.ش) با استفاده از حسگرهای حلقه زینی مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما در توکامک دماوند را با تکنیک‌های شبکه عصبی، شناسایی نمود [۱۹].  
 طلوعی در سال ۱۳۹۰ (ه.ش) با تکنیک‌های شبکه عصبی مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز جابجایی افقی پلاسما در توکامک دماوند را با استفاده از حسگرهای حلقه زینی، شناسایی نمود [۲۰].

## ۴ ۱ مروری بر ساختار پایان‌نامه

با توجه به اهمیت مسئله پایدارسازی مکان پلاسما، در این پروژه سعی بر آن است که با داشتن اطلاعات فنی و تهیه داده‌های عملی از سیستم توکامک دماوند، با کمک روش‌های شناسایی سیستم توسط شبکه عصبی مدل مکان عمودی پلاسما را بدست آورد.  
 مطالب مورد بحث در فصل‌های آینده به صورت زیر ارائه شده است:

در فصل دوم مقدمه‌ای کوتاه بر گداخت هسته‌ای و پلاسما، ویژگی‌های فیزیکی و رفتاری پلاسما، روش‌های مختلف محصور سازی و دستگاه‌های ساخته شده برای گداخت هسته‌ای ارائه می‌گردد.  
 در فصل سوم توکامک و نحوه عملکرد آن بررسی شده و مشخصات و مسائل فنی توکامک دماوند و سیستم‌های کنترل به کار رفته در آن بیان می‌شود.

در فصل چهارم روش‌های اندازه‌گیری مکان پلاسما و مسائل فیزیکی مربوط به استفاده از حسگرها و تهیه مدارات لازم جهت کنترل سیستم حلقه بسته و تهیه داده‌های مورد نیاز برای شناسایی تشریح می‌گردد.

در فصل پنجم پردازش مورد نیاز برای داده‌های مورد استفاده برای شناسایی جابجایی عمودی پلاسما انجام می‌گردد و مراحل شناسایی سیستم ارائه و مدل‌های پیش‌بین و شبیه‌ساز با ساختار شبکه عصبی طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد.

و در فصل آخر یک جمع بندی نهایی از کارهای انجام شده صورت می‌گیرد و پیشنهاداتی نیز برای تحقیقات آینده ارائه می‌گردد.

## فصل دوم:

مقدمه‌ای بر گداخت هسته‌ای و

روش‌های محصورسازی آن

## ۲ + مقدمه

مدت‌هاست که تولید انرژی به همان شیوه که در خورشید تولید می‌شود به یکی از رویاهای بشر تبدیل شده است. از اوایل قرن بیستم دانشمندان دریافتند که مبنای تولید انرژی در همه ستارگان از جمله خورشید، فرایند گداخت هسته‌ای می‌باشد اما فعالیت‌های تحقیقاتی در این زمینه از دهه ۱۹۵۰ میلادی آغاز گردید. امروزه با توجه به حادث شدن مسئله تأمین انرژی، در کشورهای زیادی تحقیقات در حوزه گداخت هسته‌ای برای دستیابی به یک منبع جدید تولید الکتریسیته در حال انجام می‌باشد.

پس از ارائه نظریه هسته اتم، محققان دریافتند منشأ انرژی نهفته در اتم در هسته آن می‌باشد که آن را انرژی هسته‌ای نامیدند. انشتین با اثبات رابطه  $E=mc^2$  نشان داد که جرم و انرژی هم‌ارزند یعنی در هر فرآیند کاهش جرم منجر به تولید مقداری انرژی می‌شود. واکنش‌های منجر به کاهش جرم به دو شیوه زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱ - شکافت هسته‌ای یعنی شکست هسته‌های سنگین‌تر به هسته‌های سبک‌تر

۲ - گداخت هسته‌ای یعنی به هم پیوستن هسته‌های سبک‌تر و تشکیل هسته‌های سنگین‌تر

هر دو روش با آزادسازی انرژی همراه است که بشر ابتدا به دنبال تأمین انرژی از روش اول بود ولی به دلیل مزایایی که روش دوم در مقایسه با روش اول دارد [از جمله انبوه بودن مواد اولیه مورد نیاز واکنش، نداشتن پسماندهای هسته‌ای و همچنین بهره بالا] توجه دانشمندان و محققان را به یافتن راهی برای تولید الکتریسیته از این روش به خود جلب کرده است.

در این فصل برای آشنایی بیشتر با گداخت هسته‌ای ابتدا در بخش ۲-۲ مطالبی درباره همجوشی هسته‌ای و همچنین در بخش ۲-۳ مطالبی راجع به پلاسما و شرایط فیزیکی آن آورده می‌شود و از آنجائیکه ایجاد گداخت هسته‌ای ملزم به فراهم شدن شرایط خاصی است، در ادامه در بخش ۲-۴ مطالب مربوط به آن شرایط و در بخش آخر روش‌های محصورسازی پلاسما آورده شده است.

## ۴۲ انرژی همجوشی هسته‌ای

در مقایسه با هسته عناصر سنگین مانند اورانیوم که انرژی‌شان در طی فرایند شکافت<sup>۱</sup> رها می‌شود، هسته‌های عناصر سبک، انرژی‌شان در فرایندهای گداخت آزاد می‌شوند. در طی فرایند گداخت دو هسته سبک به هم جوش می‌خورند و یک هسته سنگین‌تر را تشکیل می‌دهند و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود. شرایطی که برای وقوع دو فرایند شکافت و گداخت باید فراهم باشد کاملاً با یکدیگر متفاوت هستند. شکافت در محیطی روی می‌دهد که اتم‌های ساکن باشند و هسته‌های اتم مورد هدف نوترون‌های بمباران‌کننده بی‌بار قرار می‌گیرند، در حالی که واکنش گداخت در محیطی انجام می‌گیرد که هسته‌های حرکت بسیار سریعی دارند، زیرا واکنش گداخت تنها زمانی به وقوع می‌پیوندد که دو هسته برهم‌کنش‌کننده با غلبه بر نیروی دافعه الکترواستاتیک متقابل خود به یکدیگر بسیار نزدیک شوند و این تنها در شرایطی ممکن است که آن‌ها دارای سرعت نسبی بسیار زیادی باشند، که این امر به این مفهوم است که محیط باید دمای بسیار بالایی را دارا باشد. محاسبات نشان می‌دهند که واکنش‌های گداخت فقط در دماهای بالای چند ده میلیون درجه به وجود می‌آیند. در چنین دماهایی محیط خنثی وجود ندارد و محیط به پلاسمای بسیار یونیزه‌شده شامل الکترون‌های آزاد با بار منفی و یون‌های سریع با بارهای مثبت تبدیل شده است.

از نظر تئوری می‌توان دو هسته دلخواه از عناصر مختلف را به طریق واکنش گداخت به هم پیوند داد اما این عمل فقط در مورد هسته‌های سبک‌تر که بار کمتری دارند و ساده‌تر می‌توان انرژی جنبشی لازم برای نزدیک شدن آن‌ها را فراهم کرد محتمل است. در واقع اگر هسته‌هایی که در واکنش دخالت دارند سنگین باشند، گداخت نه تنها انرژی تولید نمی‌کند بلکه برای انجام شدن آن

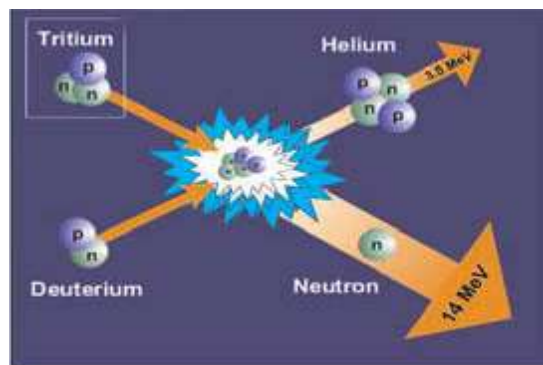
---

1-Fission

انرژی بیشتری باید مصرف گردد. برخی از واکنش‌های گداخت همراه با آزادسازی نوترون و برخی دیگر بدون آزادسازی نوترون می‌باشند. محصول اکثر واکنش‌های گداخت هلیوم می‌باشد [۴]. مقدار انرژی حاصل از یک واکنش گداخت کوچک است، بدین دلیل برای تولید انرژی قابل قبول در نیروگاه گداخت هسته‌ای باید تعداد زیادی واکنش گداخت در زمان محدودی صورت پذیرد. دوتریوم<sup>۱</sup> و تریتیوم<sup>۲</sup> از ایزوتوپ‌های هیدروژن می‌باشند، که به ترتیب دارای یک پروتون - یک نوترون و یک پروتون - دو نوترون می‌باشند. واکنش این دو ایزوتوپ که ساده‌ترین واکنش جهت دستیابی به گداخت هسته‌ای و نیز دارای بیشترین احتمال وقوع در بین دیگر واکنش‌های گداخت است. به صورت رابطه (۱-۲) می‌باشد که به صورت نمادین در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



که از ۱۷/۶Mev ، ۱۴/۱Mev مربوط به نوترون و ۳/۵Mev مربوط به He می‌باشد.



شکل ۱-۲: واکنش هسته‌ای دوتریم و تریتیوم

اما تریتیوم یک ماده ناپایدار است و به دلیل نیمه عمر نسبتاً کوتاهی که دارد در طبیعت یافت نمی‌شود که می‌توان آن را به صورت رابطه زیر تولید کرد:



1-Dotrium  
2-Tritium

بنابراین از جمع دو رابطه‌ی (۱-۲) و (۲-۲) به رابطه (۳-۲) می‌رسیم.

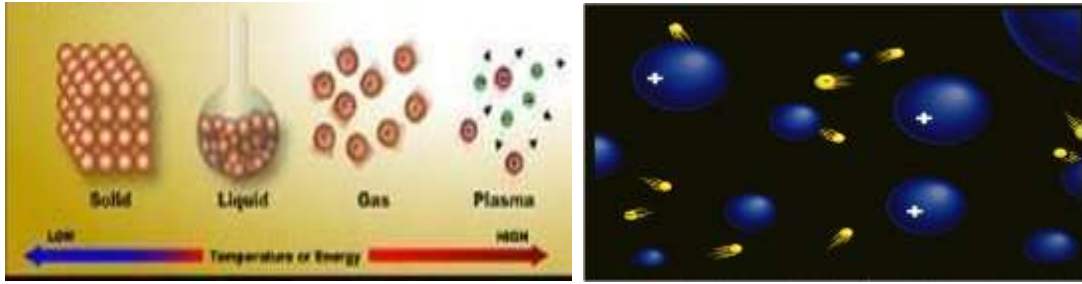


پس عناصر اصلی دوتریوم و لیتیوم بوده و تریتیوم به صورت زنجیره‌ای در میان واکنش حاصل می‌شود به این صورت که ابتدا دو تریوم با تریتیم واکنش هسته‌ای داده و نوترون پر انرژی حاصل از آن با لیتیوم موجود در دیواره اول توکامک واکنش می‌دهد و تریتیم حاصل می‌شود که دوتریم با تریتیم حاصله واکنش اصلی را منجر می‌کنند.

لیتیوم به میزان فراوانی در پوسته زمین یافت می‌شود و معادن عمده آن در آمریکا، کانادا و چند کشور آفریقایی است. آب دریا نیز شامل مقدار کمی لیتیوم است. دوتریوم نیز در آب دریا یافت می‌شود. در آب دریا به ازای هر ۶۵۰۰ اتم هیدروژن معمولی یک دوتریوم یافت می‌شود. بنابراین منابع دوتریوم و لیتیوم جهان برای میلیون‌ها سال کافی می‌باشد. به عنوان مثال تنها با استخراج ۱۰ گرم دوتریوم از ۵۰۰ لیتر آب و تولید ۱۵ گرم تریتیوم از ۳۰ گرم لیتیوم، سوخت مورد نیاز برای تأمین برق یک فرد ساکن در یک کشور صنعتی در تمام سال‌های عمرش فراهم می‌گردد [۲۱].

## ۲ ۴ پلاسما

برای فراهم نمودن شرایط لازم برای تشکیل واکنش‌های گداخت هسته‌ای، ضروری است که سوخت تا دماهای بسیار بالا گرم شده و تعداد قابل توجهی از اتم‌ها یا مولکول‌های آن یونیزه شوند. گازی که تعداد قابل توجهی از اتم‌ها یا مولکول‌های آن یونیزه شده باشند پلاسما نامیده می‌شود [۴].



شکل ۲-۲: حالت‌های ماده که در اثر انرژی جنبشی بالا، پلاسمای یونیزه شده حاصل می‌شود

یک محفظه‌ی بسته با دیواره‌هایی دارای نقطه ذوب بسیار بالا را که حاوی مقدار کمی از یک ماده جامد است را در نظر می‌گیریم. هنگامی که دمای ظرف به تدریج افزایش یابد، ماده جامد ذوب می‌شود و نهایتاً تبدیل به گاز می‌گردد. با افزایش بیشتر دما همه مولکول‌های گاز می‌شکنند و به اتم‌های منفرد تقسیم می‌شوند. این اتم‌ها دارای حرکتی سریع و تصادفی، که ناشی از برخورد آن‌ها با یکدیگر است، می‌گردند. با ادامه روند گرمادهی و افزایش دما، تا حدود ۵۰۰۰ درجه کلوین فرایند جدیدی در ماده به وقوع می‌پیوندد که در طی آن الکترون‌ها بر اثر برخورد اتم‌های سریع با یکدیگر از اتم خود جدا می‌شوند و یک یون با بار مثبت را باقی می‌گذارند و بدین ترتیب گاز در این محدوده دمایی یونیزه می‌گردد. تعداد یون‌ها و الکترون‌ها در گاز با افزایش دما به سرعت زیاد می‌شود، به طوری که در دماهایی به بزرگی ده هزار تا صد هزار درجه کلوین، بیشترین تعداد اتم‌ها یونیزه می‌شوند و عملاً اتم خنثی باقی نمی‌ماند. با این حال گاز در کل خنثی باقی می‌ماند، زیرا در فرایند یونیزاسیون بار اضافی با هر علامتی تولید نمی‌گردد (شکل ۲-۲).

یونیزاسیون در اتم هیدروژن که فقط دارای یک الکترون می‌باشد، با جداسدن این الکترون کامل می‌شود، در حالی که یونیزاسیون نهایی اتم‌های سنگین که در آن تمامی الکترون‌ها جدا می‌شوند فقط در دماهای فوق‌العاده بالا با مرتبه یک میلیون تا ده میلیون درجه کلوین به وقوع می‌پیوندد. برای ایجاد گداخت هسته‌ای با تراز مثبت انرژی باید پلاسما با حرارت و چگالی بالا برای مدت زیادی محصور نگه داشته شود.

## ۲ ۳ ۴ - ویژگی‌های فیزیکی پلاسما

اگرچه می‌توان پلاسما را به عنوان فرم ویژه‌ای از یک مخلوط گازی، در ساده‌ترین حالت مخلوط دو مولفه به نام‌های الکترون و یون در نظر گرفت، لیکن پلاسما به دلیل خواص فیزیکی بسیاری که دارد، با یک گاز معمولی که فقط حاوی ذرات خنثی است متمایز می‌باشد. این اختلافات به ویژه در رفتار پلاسما در میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی دیده می‌شود. می‌دانیم یک گاز معمولی خنثی تأثیری از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دریافت نمی‌کند در حالی که خواص پلاسما توسط این میدان‌ها به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند به این صورت که یک میدان الکتریکی هر چند ضعیف باعث ایجاد یک جریان الکتریکی در پلاسما می‌شود و در یک میدان مغناطیسی هم، پلاسما همانند یک ماده دیامغناطیس رفتار می‌کند و در نتیجه جهت مغناطیس شدن آن برخلاف جهت شدت میدان مغناطیسی اعمال شده و اندازه آن نیز ضعیف است. همچنین تأثیرات متقابل بسیار قوی با امواج الکترومغناطیسی دارد که به عنوان نمونه می‌توان به منعکس شدن امواج رادیویی توسط پلاسما اشاره کرد [۴].

## ۲ ۳ ۴ - جریان الکتریکی در پلاسما

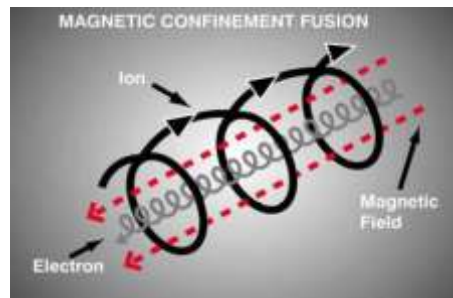
حرکت جهت‌دار الکترون‌ها و یون‌ها در پلاسما می‌تواند ناشی از وجود میدان الکتریکی خارجی و یا وجود اختلاف غلظت بین نواحی مختلف پلاسما باشد. میدان الکتریکی خارجی بر روی ذرات باردار با علامت‌های مختلف یعنی الکترون‌های منفی و یون‌های مثبت اثر می‌کند و باعث به حرکت در آمدن آن‌ها در جهت‌های مخالف می‌شود. تأثیر یون‌ها به دلیل جرم بالای آن‌ها در بوجد آمدن جریان در مقایسه با الکترون‌ها ناچیز است. در غیاب منابع خارجی نیز، بطور ذاتی میدان الکتریکی در پلاسما وجود دارد. هر ذره باردار پلاسما یک میدان الکتریکی شعاعی در همسایگی خود تولید می‌کند، به طوری که در هر نقطه داخلی یک پلاسما شاهد وجود میدانی الکتریکی با نوسانات



خیلی سریع هم در مقدار و هم در جهت می‌باشیم. در صورتی که اگر در یک فاصله زمانی به حد کافی طولانی میانگین‌گیری روی این میدان‌ها انجام شود، میانگین میدان صفر می‌شود [۴].

## ۲ ۴ ۴ - رفتار پلاسما در میدان مغناطیسی

وقتی ذرات موجود در پلاسما در یک میدان مغناطیسی قوی قرار می‌گیرند به شکل مارپیچ، در مسیر موازی با امتداد خطوط میدان و به طور جهت‌دار حرکت می‌کنند برای نمونه در شکل ۲-۳ حرکت ذرات در میدان مغناطیسی نشان داده شده است. میدان مغناطیسی، مسیر حرکت ذرات پلاسما را محدود کرده بنابراین می‌تواند موجب محصورسازی پلاسما و جلوگیری از برخورد پلاسما با دیواره‌های محفظه دربرگیرنده آن شود [۱].



شکل ۲-۳: محصورسازی مغناطیسی ذرات یونیزه شده در پلاسما

## ۲ ۴ ۴ شرایط ایجاد گداخت هسته‌ای

### ۲ ۴ ۴ - شرط اشتعال

هر چه پلاسما مدت زمان طولانی‌تری گرم و محصور نگه داشته شود، احتمال انجام واکنش‌های گداخت هسته‌ای بیشتر می‌شود.

این مدت زمان، تابع آهنگ تولید و تلف انرژی در پلاسما می‌باشد. شرایطی را که تحت آن، واکنش گداخت در پلاسما می‌تواند بدون نیاز به دریافت انرژی خارجی ادامه یابد را شرط اشتعال می‌نامند.

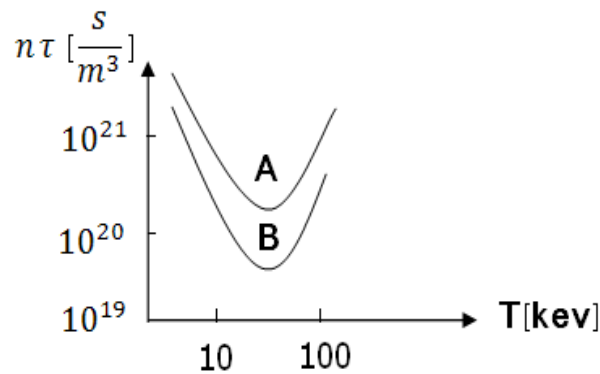
## ۲ ۴ ۴ - معیار لاوسون

معیار لاوسون معیاری کلیدی برای محصورسازی پلاسما است و تعیین می‌کند که چه ترکیب‌هایی از چگالی و زمان محصورسازی در یک دمای معین، امکان واکنش گداخت مطلوب را فراهم می‌آورد.

معیار لاوسون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$n \times \tau \geq 10^{20} \frac{s}{m^3} \quad (۴-۲)$$

که در آن  $\tau$  مدت زمان محصور بودن بر حسب ثانیه و  $n$  چگالی ذرات بر حسب  $\frac{1}{m^3}$  است. در شکل ۴-۲ نمودار A براساس شرط اشتعال و نمودار B بر اساس معیار لاوسون ترسیم شده است.



شکل ۴-۲: مقایسه نموداری شرط اشتعال (منحنی A) و معیار لاوسون (منحنی B)

دستیابی به شرط اشتعال دشوارتر از رسیدن به معیار لاوسون است و از دیدگاه عملی معیار لاوسون نشان می‌دهد که برای تولید انرژی، پلاسما باید دما (انرژی) و چگالی بالای خود را برای مدتی حفظ کند. بنابراین اولین هدف عملی افزایش دمای پلاسما تا حدود  $10 \text{ keV}$  می‌باشد و دومین هدف محصورسازی پلاسما در فضایی محدود است.

## ۲ ۵ محصورسازی<sup>۱</sup> پلاسما

با توجه به مطالب ذکر شده به این موضوع پی می‌بریم که برای ایجاد واکنش گداخت هسته‌ای با تراز مثبت انرژی باید شرایطی فراهم آورد، که در آن پلاسمای داغ با چگالی بالا، در یک فاصله زمانی به اندازه کافی طولانی در حالت تعادل قرار گیرد، به طوری که هر ذره فرصت کافی برای درگیر شدن در یک واکنش هسته‌ای را بیابد. اساساً هر قدر پلاسما داغ‌تر و چگالی آن بیشتر باشد، گداخت بیشتری روی می‌دهد، با این وجود اگر دما از حدی بالاتر رود ذرات دارای سرعت بسیار بالایی می‌گردند و در نتیجه بعد از برخورد به مدت کافی در کنار هم باقی نمی‌مانند تا جوش بخورند بنابراین تعداد واکنش‌ها کمتر می‌شود. پلاسما دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی می‌باشد، لذا جهت جلوگیری از فرار انرژی از دیواره‌های محفظه دربرگیرنده آن نیاز به عایق‌بندی محفظه می‌باشد. محفظه‌ای فلزی که بتواند پلاسمایی با دمای در حدود ۱۰۰ میلیون درجه سانتی‌گراد را در خود محصور سازد و از فرار انرژی آن از دیواره‌ها جلوگیری کند، عملاً در دسترس نمی‌باشد [۴]. بنابراین محصورسازی پلاسما داری اهمیت بسیاری می‌باشد.

## ۲ ۵ ۴ - روش‌های محصورسازی پلاسما

برای ایجاد شرایط مورد نیاز واکنش گداخت هسته‌ای روش‌های زیر شناخته شده‌اند [۶]:

- ۱ - محصورسازی گرانشی<sup>۱</sup>
- ۲ - محصورسازی اینرسی<sup>۲</sup>
- ۳ - محصورسازی مغناطیسی<sup>۴</sup>

---

1-Confinement

2-Gravitational confinement

3-Inertial confinement

4-Magnetic confinement

روش اول که اصول عملکرد خورشید و ستارگان دیگر می‌باشد به دلیل وجود نیروی جاذبه بسیار زیاد، پلاسما توسط نیروی جاذبه محصور می‌گردد. در کره زمین این شیوه امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین در زمین دو روش دیگر برای انجام گداخت هسته‌ای مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

روش دوم (محصورسازی اینرسی) که در گداخت لیزری به کار برده می‌شود، در آن پلاسما در یک مدت زمان بسیار کوتاه در حد نانوثانیه با بکارگیری نیروهای قوی بیرونی با چگالی بسیار زیاد محصور می‌گردد.

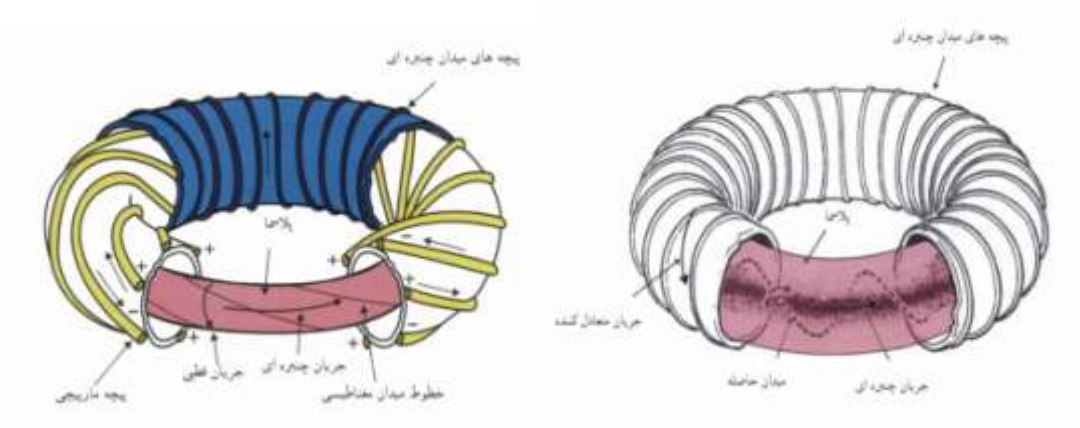
در روش سوم یعنی محصورسازی مغناطیسی، پلاسما با میدان مغناطیسی محصور می‌شود به این صورت که چون پلاسما از ذرات باردار تشکیل شده برای محصورسازی آن می‌توان از بار الکتریکی هسته‌ها و الکترون‌ها استفاده کرد. قطع خطوط میدان مغناطیسی برای یک ذره باردار دشوار است. بنابراین ذرات حول این خطوط می‌توانند بچرخند. پس پلاسما توسط میدان مغناطیسی به شکل مناسب محصور می‌گردد. چگالی در این حالت بسیار کمتر از روش محصورسازی اینرسی می‌باشد اما زمان محصورسازی در آن بسیار مهم و از مرتبه ثانیه است [۱۹].

اولین دستگاه‌های محصورساز مغناطیسی که در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ میلادی در انگلستان توسعه داده شدند پینچ‌های چنبره‌ای بودند که سعی داشتند پلاسما را به وسیله یک میدان قوی قطبی خالص که توسط پلاسمای چنبره‌ای تولید می‌شد، محصور کنند که در نهایت ثابت شد محصورسازی انرژی مناسبی در آن انجام نمی‌گردد. بعد از آن در سال‌های آغازین دهه‌ی ۱۹۵۰ در پرینستون روش استلاراتور<sup>۱</sup> اختراع شد که نحوه عملکرد آن به این صورت است که به وسیله یک میدان مغناطیسی چنبره‌ای که توسط یک سیملوله چنبره‌ای خارجی بدون این که هیچ جریانی از

---

1-Astelarator

پلاسما عبور کند تولید می‌گشت که با مشکلاتی روبرو شد که همچنان در سدد رفع مشکلاتش هستند که شمایی از آنها در شکل ۲-۵ آمده است.



ب: استلاراتور

الف: پینچ چنبره‌ای

شکل ۲-۵: شمایی از اولین دستگاه‌های چنبره‌ای

در دهه‌ی ۱۹۶۰ سومین و موفق‌ترین طرح برای محصورسازی مغناطیسی یعنی توکامک در مسکو توسعه یافت که می‌توان به عنوان یک پینچ چنبره‌ای با میدان مغناطیسی چنبره‌ای پایدار ساز بسیار قدرتمند در نظر گرفت [۱].

از آنجائیکه مسئله گداخت هسته‌ای برای بشر دارای اهمیت بسیاری است و با توجه به مسائل ارائه شده در این فصل، اهمیت دستگاه توکامک و سیستم‌های به‌کار رفته در آن مشخص می‌گردد. بنابراین در فصل آینده به توضیح توکامک و سیستم‌های کنترلی در آن پرداخته می‌شود.

## فصل سوم:

توکامک دماوند و سیستم‌های کنترل

مکان عمودی پلاسما در آن

### ۳ + مقدمه:

نام توکامک از ۳ واژه روسی (Toroidalnaya Kamera Magnitnaya) به معنای محفظه مغناطیسی چنبره‌ای، گرفته شده است. این دستگاه نخستین بار در اتحاد جماهیر شوروی ساخته شد و تغییرات تکاملی آن در اواخر دهه ۱۹۵۰ صورت گرفت. در این دوره، تحقیقات مشابهی در انگلیس و آمریکا به شدت دنبال می‌شد. توکامک در این راستا با برخورداری از پایداری فزاینده در نتیجه اعمال میدان مغناطیسی چنبره‌ای از دیگر دستگاه‌های محصورسازی متمایز بود.

در این دوره در زمینه توکامک پیشرفت‌های موفقیت آمیزی از جمله: کاهش ناخالصی‌های موجود و امکان جداسازی پلاسما از محفظه‌ی خلاء با استفاده از وسیله‌ای به نام محدودکننده صورت پذیرفت. این پیشرفت در دهه‌ی ۱۹۶۰ منجر به تولید پلاسمایی با درجه خلوص بالا و دمای الکترونی حدود ۱keV شد.

زمان محصورسازی پلاسما در توکامک‌های اولیه چند میلی‌ثانیه و دمای یونی در حدود چند صد الکترون ولت بود. در دهه ۱۹۷۰ در راستای بهینه‌سازی شرایط محصورسازی، تحقیقات بسیاری انجام شد و به منظور تحقق بخشیدن به این هدف توکامک‌های بسیاری در کشورهای گوناگون جهان ساخته شدند. از سال ۱۹۸۰ به بعد با ساخت توکامک‌های بزرگ، تحقیقات بنیادین در این موضوع باعث افزایش در زمان محصورسازی و کنترل پلاسمای تولید شده در مقابل ناپایداری‌های آن شد.

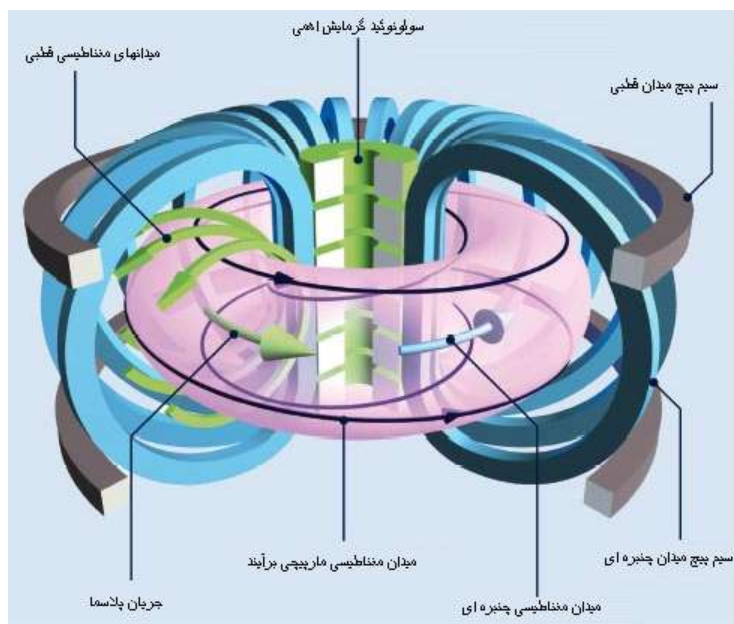
در حال حاضر نیز تحقیقات پیرامون خواص پلاسما و بررسی پدیده‌هایی که در آن اتفاق می‌افتد برای رسیدن به شرایطی که پلاسما برای زمان‌های طولانی‌تر مورد کنترل و محصورسازی باشد در حال انجام است [۲].

در این فصل ابتدا در بخش ۳-۲ به طور کلی مباحثی در رابطه با نحوه عملکرد توکامک ارائه می‌شود سپس در بخش ۳-۳ توکامک دماوند به عنوان دستگاه مورد آزمایش و مشخصات آن بیان

می‌گردد. در ادامه در بخش ۳-۴ انواع سیستم‌های کنترل به‌کار رفته در توکامک دماوند به‌طور کامل تشریح می‌شود.

### ۳ ۴ دستگاه توکامک

توکامک دستگاه چنبره‌ای محصورسازی پلاسماست، که پلاسما در آن توسط میدان مغناطیسی محصور می‌گردد. همانطور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، توکامک از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به پیچ‌های چنبره‌ای<sup>۱</sup> که وظیفه محصورسازی پلاسما را دارد، پیچ‌های قطبی<sup>۲</sup> که وظیفه کنترل شکل و مکان پلاسما را دارد و سیستم گرمایش پلاسما<sup>۳</sup> اشاره کرد.

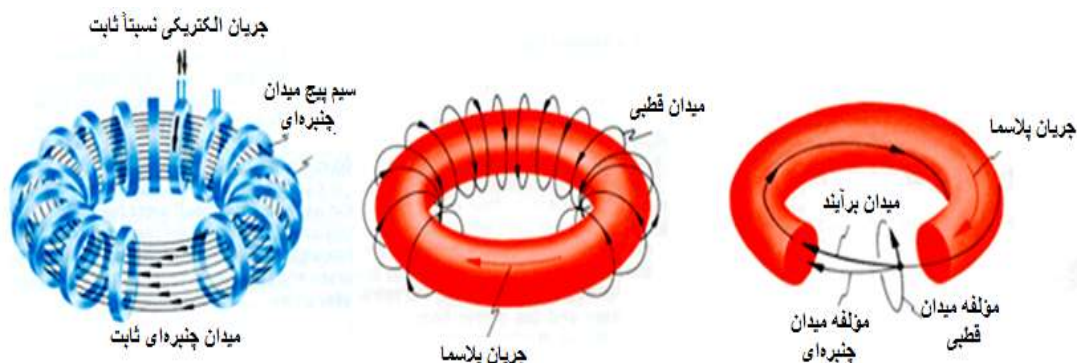


شکل ۳-۱: شماتیک از سیستم توکامک

- 1-Toroidal Coils
- 2-Poloidal Coils
- 3-Plasma Heating



محفظه خلأ توکامک به فرم چنبره‌ای می‌باشد که شعاع چنبره شعاع اصلی و شعاع ستون پلاسما شعاع فرعی نامیده می‌شود. ترانسفورمری<sup>۱</sup> به منظور القای جریان الکتریکی در امتداد محور مرکزی محفظه قرار دارد به صورتی که هسته آهنی ترانسفورمر عمود بر چنبره و در مرکز شعاع اصلی می‌باشد. پلاسمای چنبره‌ای نقش سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر را دارد به طوری که با عبور جریان از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورمر و به دنبال آن با تغییر شار مغناطیسی در هسته آهنی، جریانی به صورت القایی در امتداد محور گاز داخل چنبره ایجاد می‌شود و پلاسمای دایره‌ای شکل که به این ترتیب ایجاد شده است از این پس نقش ثانویه ترانسفورمر را خواهد داشت. این جریان القایی که همان جریان پلاسما است یک میدان مغناطیسی قطبی حول ستون پلاسما ایجاد می‌کند که باعث فشردگی آن می‌شود. برای جلوگیری از ناپایداری پلاسما، سیم‌پیچی روی سطح خارجی محفظه پیچیده شده است تا میدان مغناطیسی دیگری به نام میدان چنبره‌ای در امتداد محور مرکزی پلاسما تولید گردد. این سیم‌پیچ در اطراف ستون پلاسما و در امتداد میدان قطبی قرار گرفته است. لازم به ذکر است میدان‌های مغناطیسی قطبی حدود ۵ تا ۱۵ مرتبه کوچکتر از میدان چنبره‌ای هستند. ترکیب میدان‌های قطبی و چنبره‌ای منجر به پیچش خطوط میدان به دور پلاسما می‌شود. شکل ۳-۲ نحوه محصورسازی پلاسما توسط این دو میدان را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۳-۲: نحوه تشکیل میدان برآیند جهت محصورسازی پلاسما

### ۳ ۳ توکامک دماوند

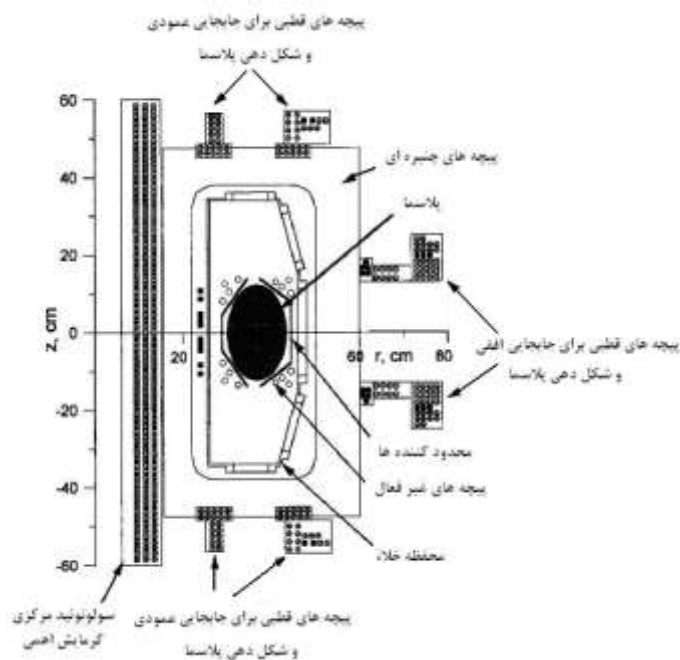
از آنجایی که ساخت و نگهداری توکامک‌های بزرگی که توان تولید برق را داشته باشند مستلزم صرف هزینه‌های زیادی می‌باشند، به منظور تحقیق و بررسی بیشتر پیرامون مسائل فیزیک پلاسما، توکامک‌های کوچک ساخته شدند که از آن جمله می‌توان به توکامک دماوند اشاره نمود.

در توکامک دماوند امکان تحقیقات فیزیک پلاسما تحت شرایط نزدیک به آرایش مغناطیسی در تحقیقات بین‌المللی وجود دارد. بنابراین این توکامک به دلیل داشتن سطح مقطع D شکل، دارا بودن سیستم کنترل جابجایی و شکل پلاسما، کشیدگی عمودی و همچنین دارا بودن دستگاه‌های تشخیصی متنوع دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در این توکامک با اعمال نیروهای مغناطیسی خارجی کشیدگی عمودی ستون پلاسما حاصل می‌گردد که این کشیدگی باعث افزایش شدت جریان پلاسما و کاهش ناپایداری فیزیکی MHD<sup>۱</sup> می‌شود که خود حائز اهمیت است. البته اعمال این نیروهای خارجی، افزایش ناپایداری مکان عمودی پلاسما را به دنبال دارد که با یک سیستم کنترل مناسب باید مصالحه‌ای بین دو موضوع صورت پذیرد [۲۲]، [۲۳].

نمایی از محفظه و سیم‌پیچ‌های مجموعه تحقیقاتی توکامک دماوند را که برای پژوهش در زمینه گداخت هسته‌ای طراحی و ساخته شده است، در شکل ۳-۳ و سطح مقطع این توکامک در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: نمایی از توکامک دماوند



شکل ۳-۴: سطح مقطع توکامک دماوند [۱۹]

با توجه به این شکل، پلاسما در مرکز چنبره در شعاع ۳۶ سانتی‌متری تشکیل می‌شود و در داخلی‌ترین قسمت محفظه محدودکننده<sup>۱</sup> قرار گرفته‌اند که در پشت آن پیچه‌های چهار قطبی به عنوان کنترل‌کننده غیرفعال برای کنترل عمودی و افقی مکان پلاسما می‌باشند. پیچه‌های قطبی که برای کنترل فعال مکان عمودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به تعداد ۸ دور با اندوکتانس  $L_z=270\ \mu\text{H}$  در موقعیت فضایی  $R=49\text{cm}$  و  $Z=51\text{cm}$  می‌باشند. پیچه‌های قطبی که برای کنترل فعال مکان افقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به تعداد ۵ دور با اندوکتانس  $L_R=180\ \mu\text{H}$  در موقعیت فضایی  $R=61/5\text{cm}$  و  $Z=16/5\text{cm}$  می‌باشند. در ادامه سیستم‌های کنترل موقعیت افقی و عمودی به صورت مفصل توضیح داده می‌شود.

مشخصات و پارامترهای اصلی توکامک دماوند در جدول ۱-۳ آورده شده است. برای مطالعه سایر جزئیات آن به مرجع مراجعه شود [۷].

جدول ۱-۳: پارامترهای اصلی توکامک دماوند

مقدار	پارامتر
۳۶ cm	شعاع اصلی
۷ cm	شعاع فرعی
۱۲ cm	شعاع عمودی پلاسما
۵/۱	نسبت ظاهری
۱/۲_۱/۴	کشیدگی <sup>۲</sup> سطح مقطع
۱/۲ T	شدت میدان مغناطیسی چنبره‌ای
۴۰ KA	بیشینه جریان پلاسما
$3 \times 10^{19}\ \text{m}^{-3}$	بیشینه چگالی پلاسما
$150\ \text{eV}^3$	بیشینه دمای یون
۳۰۰ eV	بیشینه دمای الکترون
۲۰	تعداد سیم پیچ‌های میدان چنبره‌ای
$0.091\ \text{m}^3$	حجم محفظه خلاء
۸۰ KW	توان گرمایش توسط RF
۱۵ GHZ	فرکانس RF
۲۱ ms	حداکثر زمان محصورسازی پلاسما

1-Limiter

2-Elongation

3- $1\text{eV}=11600\ \text{K}$

شرایط اصلی و مهم برای تخلیه الکتریکی توکامک دماوند که در این پژوهش داده‌های سیستم بر اساس آن تهیه شده، به صورت زیر است:

۱- میزان خلأ محفظه در حدود  $10^{-6} \times 1/6$  Torr می‌باشد که در تمام زمان تهیه داده با استفاده از پمپ‌های توربو مولکولی و جذبی، خلأ سیستم در این محدوده حفظ گردیده است.

۲- گاز ورودی سیستم برای تهیه داده‌ها هیدروژن خالص است که پس از تزریق گاز، فشار محفظه در حدود  $10^{-5} \times 4$  Torr کنترل می‌شود.

۳- سیستم پیش‌یونش برای یونیزاسیون و تشکیل پلاسما به دو صورت زیر است:

➤ گرمایش اهمی با تخلیه بانک خازنی SFB1 در زمان ۱۸ms.

➤ اعمال پالس RF با پهنای  $200 \mu s$  با توان ۴۰KW و فرکانس ۱۴/MGHZ بوسیله

سیستم مگنترون در زمان ۱۵ms.

۴- میزان شارژ اولیه ولتاژ بانک‌های خازنی TFB<sup>۱</sup>، FIB<sup>۲</sup>، SIB<sup>۳</sup>، EFB1<sup>۴</sup>، EFB2<sup>۵</sup>، SFB1<sup>۶</sup>،

SFB2<sup>۷</sup> به همراه تأخیر زمانی لازم برای هر یک از آنها مطابق جدول ۲-۳ می‌باشد.

جدول ۲-۳: میزان شارژ بانک‌های خازنی توکامک دماوند و تأخیر زمانی آن‌ها در این پروژه

	TFB	FIB	SIB	EFB1	EFB2	SFB1	SFB2	RF
ولتاژ (KV)	۱/۸	۳/۹	۲/۶۵	۱/۷	۱/۲	۲/۵	—	۱۱
زمان اعمال (ms)	۰	۳۲/۱	۳۶/۵	۳۲/۳	۳۶	۱۸	—	۱۵

۵- اعمال کنترل کننده مکان عمودی برای جابجایی و کنترل پلاسما در زمان ۳۷ میلی ثانیه.

1-Toroidal Field Bank

2-Fast Inductor Bank

3-Slow Inductor Bank

4-Equilibrium Field Bank1(Fast)

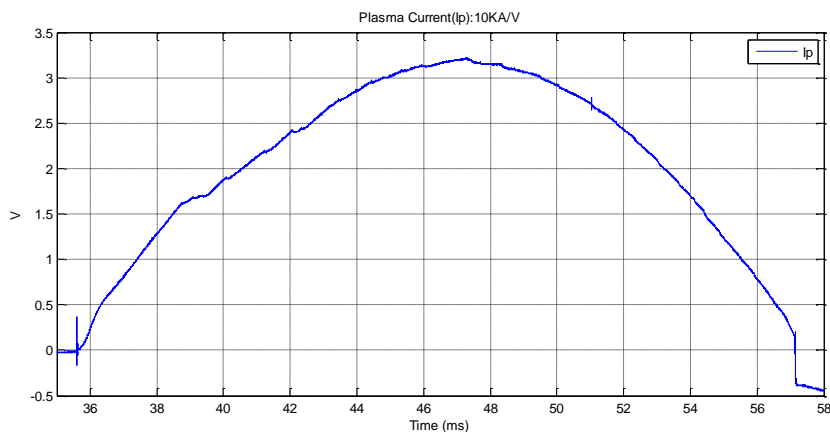
5-Equilibrium Field Bank2(Slow)

6-Shaping Field Bank1

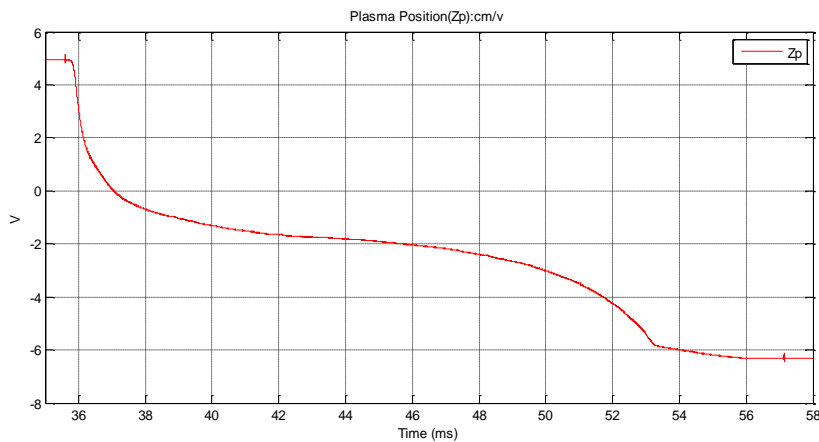
7-Shaping Field Bank2

### ۴ ۳ سیستم‌های کنترل موقعیت پلاسما در توکامک دماوند:

توازن داخلی میان فشار پلاسما و نیروهای حاصل از میدان مغناطیسی و همچنین مفهوم شکل و مکان پلاسما که بوسیله جریان سیم‌پیچ‌های خارجی و اعمال میدان، قابل کنترل هستند از مفاهیم اصلی مورد توجه برای تعادل توکامک می‌باشند [۵]. پلاسما در توکامک، تحت فشار ذرات پلاسما و فشار مغناطیسی قرار دارد که تعادل میان این دو فشار به پلاسمایی متعادل منجر می‌شود [۱۵]. در این سیستم از یک طرف حرکت عمودی ستون پلاسما ذاتاً ناپایدار است و از طرفی کشیدگی عمودی پلاسما به منظور افزایش جریان و کاهش ناپایداری MHD، باعث تشدید ناپایداری عمودی پلاسما می‌گردد [۲۴]. برای نمونه نمودارهای مربوط به جریان و مکان پلاسما برای ۱ شات در حالت بدون کنترل در شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ آورده شده است.



شکل ۳-۵: نمودار جریان پلاسما



شکل ۳-۶: نمودار مکان عمودی پلاسما ( $Z_p$ )

همان طور که در شکل ۳-۶ مشخص است پلاسما در حالت بدون کنترل از زمان تشکیل تا اتمام پلاسما به سمت پایین حرکت می‌کند. این ناپایداری‌ها موجب برخورد پلاسما به محدودکننده<sup>۱</sup> و آشفستگی<sup>۲</sup> آن می‌شود. از طرفی پلاسما در اثر کوچک‌ترین برخورد با بدنه، از بین خواهد رفت. بنابراین باید مکان ستون پلاسما از مرکز محفظه کمترین جابجایی را داشته باشد که برای رسیدن به این هدف سیستم‌های کنترل پلاسما دارای اهمیت فراوانی می‌باشند.

در همین راستا در بخش ۳-۴-۱ سیستم کنترل حلقه باز جابجایی عمودی و در بخش ۳-۴-۲ سیستم کنترل حلقه بسته برای توکامک دماوند توضیح داده شده است.

### ۳ ۴ ۱ - سیستم کنترل حلقه باز جابجایی عمودی پلاسما

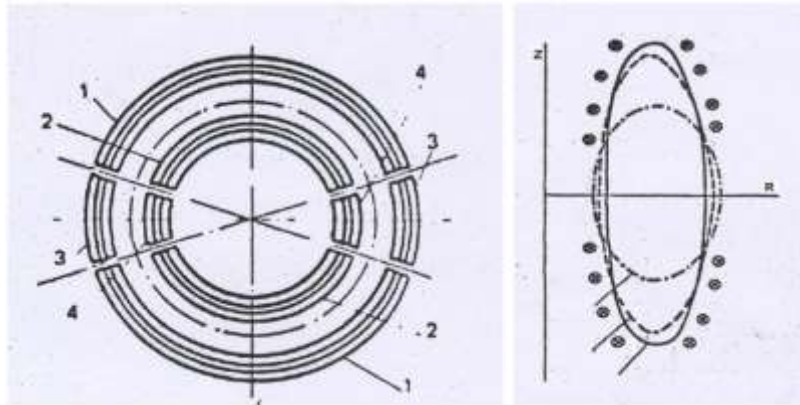
#### ۳ ۴ ۱ - کنترل غیرفعال

یکی از روش‌های کنترل پلاسما بکار رفته در توکامک‌های اولیه استفاده از حلقه‌های غیرفعال<sup>۳</sup> یا پوسته‌های غیرفعال<sup>۴</sup> است که در توکامک دماوند نیز بکار گرفته شده است. به دلیل عدم اتصال به منابع خارجی آن را غیر فعال و به علت قطعه قطعه بودن هر حلقه و اتصال ابتدا و انتهای قطعه‌های موازی با خودش آن را پوسته می‌نامند.

همانطور که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است هر پوسته متشکل از چهار حلقه زینی<sup>۵</sup> می‌باشد که پلاسما را احاطه می‌کنند. به این صورت که دو تکه بزرگ با کمان ۱۴۴ درجه و دو تکه کوچک با کمان ۳۶ درجه بوده و فاصله بین آن‌ها ۱۰ میلی‌متر است [۱۹].

---

1-Limiter  
2-Disruption  
3-Passive Coils  
4-Passive shells  
5-Saddle loop



شکل ۳-۷: شمای کلی از حلقه‌های کنترلی غیرفعال

عملکرد حلقه‌های کنترلی به این گونه است که در صورتی که پلاسما تعادل خود را از دست داده و بسمت بالا یا پایین و چپ یا راست حرکت کند، پلاسما در فاصله ۱۰ میلی‌متری بین قطعه‌ها نفوذ کرده و آن محیط را رسانا می‌کند. پس از تشکیل حلقه رسانای کامل، شار مغناطیسی ناشی از جریان پلاسما موجب القای جریان در حلقه‌های غیر فعال می‌گردد. این جریان با تولید میدان مغناطیسی و در نتیجه با اعمال نیرویی در خلاف جهت حرکت پلاسما مانع از حرکت آن می‌شود و به این ترتیب از ناپایداری پلاسما جلوگیری می‌کند [۱۹].

در توکامک دماوند این حلقه‌ها توسط سازنده آن نصب شده‌اند که در دو حالت حلقه باز و بسته عمل می‌کنند که به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری جریان این حلقه‌ها، آنرا جزئی از دستگاه در نظر می‌گیریم.

هر چند این روش ساده‌ای برای کنترل مکان می‌باشد ولی قدرت کنترلی ضعیفی را دارد و فقط در پلاسمایی که چگالی کم و میدان ضعیفی دارد مفید واقع می‌شود. زیرا در صورت رشد جریان پلاسما و افزایش میدان مغناطیسی قطبی ناشی از آن و در نهایت نفوذ این میدان در دیواره چنبره تعادل از بین می‌رود [۱۹].

بنابراین ضروری است از یک میدان مغناطیسی خارجی برای کنترل مکان پلاسما بهره‌گیری شود.



### ۳ ۴ ۴ - کنترل کننده حلقه باز برنامه‌ریزی شده

استفاده از کنترل حلقه باز برنامه‌ریزی شده نیز یکی از روش‌های کنترل مکان پلاسما می‌باشد. در این روش اندازه و جهت میدان مورد نیاز، بر اساس پارامترهای پلاسمای مورد انتظار، از پیش تعیین می‌گردد.

عملکرد سیستم کنترل کننده حلقه باز برنامه‌ریزی شده به این صورت است که در حالت بدون کنترل، جریان و جابجایی مکان پلاسما در هر لحظه اندازه‌گیری شده و با محاسبه نیرو و میدان لازم برای اصلاح جابجایی مکان پلاسما، جریان مورد نیاز هر یک از سیم‌پیچ‌های کنترلی مشخص شده و در تخلیه‌های بعدی در سیم‌پیچ‌های کنترلی جاری می‌شود.

برای پیش برنامه‌ریزی جهت عبور جریان در سیم‌پیچ‌های کنترلی، تجربه زیادی لازم است. گرچه این روش برای بعضی از توکامک‌ها ممکن است جوابگو باشد، ولی در توکامک‌های پیشرفته که احتمال وقوع حالت‌هایی که پارامترهای پلاسما تغییرات ناگهانی داشته باشند و یا وقوع حالت‌های غیرقابل پیش‌بینی وجود دارد، استفاده از این روش مناسب نیست [۲۳].

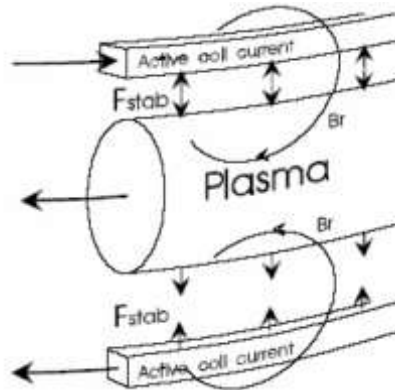
### ۳ ۴ ۳ - سیستم کنترل حلقه بسته جابجایی عمودی پلاسما

از آنجایی که با توجه به مطالب ارائه شده در فوق، روش‌های کنترل حلقه باز توانایی کنترل مناسب مکان پلاسما را ندارند، لازم است یک سیستم کنترل حلقه بسته بتواند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد.

برای کنترل جابجایی عمودی ستون پلاسما باید یک میدان مغناطیسی متغیر در جهت شعاعی داشته باشیم که نیرویی در جهت عمودی به ستون پلاسما وارد کند که این نیرو بتواند در جهت عمودی ستون پلاسما را جابجا کند. برای تولید این میدان مغناطیسی از سیم‌پیچ‌های فعال استفاده می‌شود که جریان در این سیم‌پیچ‌ها، میدان مورد نیاز را تولید می‌کند.

برای این که بتوانیم در مواردی جهت نیرو را عوض کنیم باید یک جریان متغیر داشته باشیم

که با تغییر جهت جریان در سیم‌پیچ‌ها جهت میدان و در نتیجه جهت نیرو را عوض کنیم. در شکل ۳-۸ جهت جریان در سیم‌پیچ‌ها و جهت نیروی وارد شده به پلاسما نشان داده شده است.

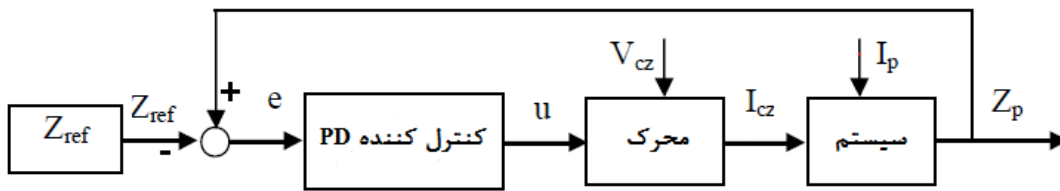


شکل ۳-۸: نمایش کنترل فعال

با تغییر جهت جریان در سیم‌پیچ‌ها، جهت میدان مغناطیسی تولید شده، عوض می‌شود و در نتیجه جهت نیروی وارد شده به پلاسما نیز تغییر می‌کند [۲۳]. بنابراین میزان نیروی وارد شده به پلاسما به تعداد دور سیم‌پیچ‌ها، اندازه جریان عبوری از آن‌ها، جهت جریان عبوری از آن‌ها و اندازه جریان پلاسما بستگی خواهد داشت.

در حالت کلی تغییر یکی از پارامترهای پلاسما، تغییر چندین پارامتر دیگر پلاسما را منجر می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن دینامیک پلاسما، تعیین تابع تبدیل مشخصی برای حرکت پلاسما به منظور اهداف کنترلی بسیار سخت است. به همین خاطر در عمل روش‌های ساده شده خطی برای کنترل پلاسما مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا تا سال ۲۰۰۰ کنترل‌کننده‌های ساخته شده برای مکان پلاسما عموماً از نوع PID بوده است.

در توکامک دماوند نیز کنترل‌کننده خطی PD برای کنترل حلقه بسته مکان عمودی پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است که شکل ۳-۹ بیانگر بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته است.

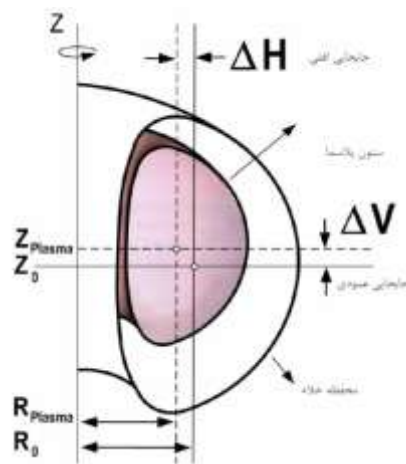


شکل ۳-۹: بلوک دیاگرام سیستم کنترل حلقه بسته مکان عمودی پلاسما با استفاده از کنترلر کننده PD [۲۵]

در آن  $I_p$  بیانگر جریان پلاسما،  $I_{CZ}$  و  $V_{CZ}$  به ترتیب بیانگر جریان کنترلی عمودی و ولتاژ اعمال شده برای تولید جریان کنترلی،  $Z_{ref}$  مکان مرجع و  $Z_p$  مکان عمودی پلاسما می‌باشد.

### ۳-۴-۳ روش‌های اندازه‌گیری مکان پلاسما در توکامک:

قبل از اعمال تکنیک‌های کنترل پلاسما باید بطور دقیق و صریح مکان پلاسما مشخص گردد. از طرفی تحلیل تئوری مکان پلاسما بسیار دشوار می‌باشد ولی به دلیل تقارن محوری در توکامک، می‌توان جابجایی ستون پلاسما از مرکز محفظه خلأ را به دو بخش جابجایی افقی و جابجایی عمودی تقسیم نمود. همانطور که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است میزان فاصله عمودی مرکز ستون پلاسما از مرکز محفظه را جابجایی عمودی ( $\Delta V$ ) و مقدار فاصله افقی ستون پلاسما از مرکز محفظه را جابجایی افقی ( $\Delta H$ ) می‌نامیم [۲۵].



شکل ۳-۱۰: جابجایی افقی و عمودی پلاسما در توکامک با سطح مقطع D شکل [۲۵]

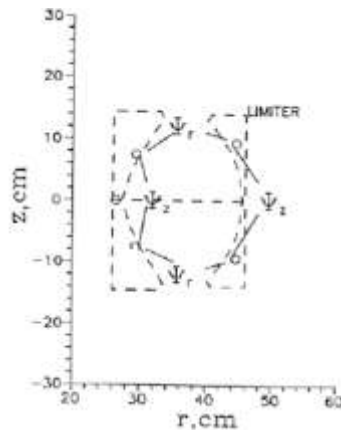
اکثراً برای اندازه‌گیری مکان پلازما در توکامک‌ها از میدان قطبی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای حلقه زینی<sup>۱</sup> و حسگرهای مغناطیسی<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند [۱۱]، [۲۲] و [۲۶] که در توکامک دماوند ۲ حسگر حلقه زینی و ۴۸ حسگر مغناطیسی قرار داده شده است.

### ۳-۴-۱ - استفاده از حسگرهای حلقه زینی:

در توکامک دماوند حلقه‌هایی در دیواره، ۱۴۴ درجه از محفظه را پوشش می‌دهند بدین گونه که یک زوج حلقه در بالا و پایین و زوج دیگر در چپ و راست امتداد افق محفظه مطابق شکل ۳-۱۱ قرار دارند و نحوه عملکردشان به این صورت است که شار میدان مغناطیسی قطبی ( $\Psi_Z$ ) بین زوج نقاط قرینه را اندازه‌گیری می‌نمایند. همانطور که در رابطه (۳-۱) و (۳-۲) نشان داده شده است، سیگنال خروجی این حسگرها متناسب با انتگرال حاصلضرب جریان در جابجایی است [۲۷]. قابل ذکر است که  $K$  گین انتگرال گیر است ( $k=1$ ) و  $C$  با اعمال شرایط اولیه صفر می‌شود.

$$\dot{\Psi}_Z = I_p \dot{Z} \quad \rightarrow \quad \Psi_Z = k \int I_p \dot{Z} dt + c \quad (۳-۱)$$

$$\dot{\Psi}_R = I_p \dot{R} \quad \rightarrow \quad \Psi_R = k \int I_p \dot{R} dt + c \quad (۳-۲)$$



شکل ۳-۱۱: نحوه قرار گرفتن حلقه‌های زینی در توکامک دماوند

1-Saddle Loops  
2-Magnetic Probes

### ۳ ۴ ۴ - استفاده از حسگرهای مغناطیسی:

حسگرهای مغناطیسی در توکامک دماوند برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در لوله‌هایی با ضخامت  $0/6$  میلی‌متر از جنس فولاد ضد زنگ قرار داده شده‌اند و سطح مقطع چنبره‌ای پلاسما را احاطه می‌کنند. به طور کلی حسگرها در نقاط خاصی جایگذاری می‌شوند تا میدان‌های مماسی و عمودی را اندازه‌گیری کنند. با تحلیل خروجی آن‌ها می‌توان علاوه بر جابجایی افقی و عمودی، سطح مقطع ستون پلاسما را نیز اندازه‌گیری نمود. در توکامک‌های بزرگ تعداد این حسگرها بیش از  $100$  عدد می‌باشد ولی در توکامک دماوند با توجه به ابعاد آن  $48$  حسگر مغناطیسی وجود دارد که از آن تعداد،  $24$  حسگر MP برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی قطبی (پلوئیدالی) و به تعداد  $24$  حسگر MP برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی شعاعی (رادالی) استفاده می‌شود.

حسگرهای MP پلوئیدالی دارای اندوکتانس  $L_p=160\mu H$  و مقاومت  $R_p=20\Omega$  و حسگرهای شعاعی با اندوکتانس  $L_p=1mH$  و مقاومت  $R_p=25\Omega$  در چنبره قرار گرفته شده است.

مدل محرک و مدل کنترل‌کننده PD تعیین شده [۱۹] و مدلهایی برای مکان افقی و عمودی پلاسما برای سیستم بر اساس حسگرهای حلقه زینی در طی سال‌های اخیر تهیه شده است [۱۹]، [۲۰] ولی از آنجائیکه برای، برای بدست آوردن خواص تعادل ماکروسکوپی (شکل و جابجایی مرز پلاسما و متوسط فشار پلاسما) می‌توان از میدان‌های قطبی استفاده نمود. برای اندازه‌گیری این میدان، آرایشی از حسگرهای مغناطیسی (MP) که در موقعیت‌های قطبی مختلف در نزدیکی دیواره چنبره قرار گرفته و پلاسمای توکامک را احاطه کرده‌اند، استفاده می‌شوند [۱۱] و [۲۲] و [۲۶]. در این پروژه هدف تعیین مدل غیرخطی عصبی برای سیستم بر اساس حسگرهای مغناطیسی می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان کنترل‌کننده مناسبی را طراحی نمود.

روسی بودن کل مجموعه توکامک دماوند و عدم وجود نقشه‌ها و مدارهای مربوطه و مشخص نبودن معادلات کامل سیستم حلقه بسته نیز باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای شده است. به همین

منظور برای شناسایی مدل مکان پلاسما ضروری است ساختار و توابع سیستم موجود از لحاظ فیزیکی و الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفته و محدودیت‌های سیستم شناسایی گردند. در نتیجه در این پروژه کارهای زیر برای ادامه آن انجام شد:

۱. از آنجائیکه برای بدست آوردن میدان‌های قطبی از حسگرهای مغناطیسی استفاده می‌شود، باید ضریب کالیبره آن‌ها محاسبه شود که با طراحی و انجام آزمایشی ضریب کالیبره حسگرهای مغناطیسی تعیین می‌گردد.

۲. برای تحلیل میدان‌های قطبی به منظور محاسبه مکان پلاسما و شناختن عوامل فیزیکی مؤثر برای تهیه مدل مناسب سیستم، باید محل دقیق حسگرها مشخص باشد. به دلیل اهمیت این موضوع، صحت نقشه مکان قرارگیری حسگرهای مغناطیسی که توسط روس‌ها ارائه شده است بررسی می‌گردد که طی آن مشخص شده نقشه موجود درست نبوده و با اندازه‌گیری‌های انجام شده، نقشه صحیح بدست می‌آید.

۳. سیستم حلقه بسته تا کنون بر اساس کنترل شار میدان مغناطیسی ( $\Psi_Z$ )، حاصلضرب جریان پلاسما در مکان پلاسما) اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای حلقه زینی عمل می‌کرد که برای افزایش دقت و کنترل دقیق موقعیت عمودی پلاسما، موقعیت دقیق پلاسما با تقسیم شار میدان مغناطیسی بر جریان پلاسما حاصل گردید و به طور مستقیم موقعیت عمودی پلاسما کنترل گردید. برای اینکه بتوان این کنترل را انجام داد مدار مربوط به تولید سیگنال مکان عمودی پلاسما ( $Z_P$ ) طراحی و ساخته شد.

۴. مدار تقویت‌کننده سیگنال PRBS<sup>۱</sup> ورودی مرجع، مدار کنترل‌کننده PD، تنظیمات آن و تقسیم‌کننده بیان شده در قسمت قبل به طور متمرکز در یک برد الکترونیکی طراحی و ساخته شد.

از آنجائیکه انجام کارهای بیان شده در بالا برای انجام پروژه و تهیه داده‌های عملی سیستم، امری ضروری بود همه این کارها به دقت انجام گردید که در فصل بعد به صورت مفصل توضیح داده شده است. البته قابل ذکر است که این کارها باعث ارتقاء کیفی سیستم کنترل موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند شده است.

---

1-Pseudo Random Binary Signal

فصل ۴ -

## فصل چهارم:

# بهبود سیستم اندازه‌گیر و کنترل موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند



#### ۴ + مقدمه:

سیستم حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلاسما دارای اهمیت بسیاری است. همان‌طور که گفته شد، در توکامک دماوند تاکنون سیستم حلقه بسته کنترل، برای کنترل شار میدان مغناطیسی قطبی ( $\Psi_Z$ )، عمل می‌کرد. در واقع با کنترل  $\Psi_Z$  که حاصل ضرب جریان پلاسما در مکان پلاسما است، کنترل موقعیت پلاسما انجام می‌شد. برای بهبود عملکرد سیستم کنترل جابجایی عمودی پلاسما، در این پروژه با طراحی و ساخت مدار مربوط به تولید سیگنال مکان عمودی پلاسما ( $Z_P$ )، به طور مستقیم مکان عمودی پلاسما کنترل شد که در بخش ۴-۲، روند طراحی و ساخت مدار ارائه می‌گردد. همچنین به منظور استفاده از حسگرهای مغناطیسی باید مسائل فیزیکی مربوط به حسگرها، محل قرارگیری آن‌ها و کالیبره حسگرها بررسی می‌گردید که به ترتیب در بخش‌های ۴-۳ و ۴-۴ به مباحث مربوطه پرداخته می‌شود.

#### ۴ ۴ طراحی و ساخت مدار اندازه‌گیر مکان عمودی پلاسما و کنترل‌کننده PD

از آنجایی که شناسایی مدل پلاسما نیازمند اندازه‌گیری جابجایی عمودی پلاسما می‌باشد از حسگرهای حلقه زینی<sup>۱</sup> و حسگرهای مغناطیسی<sup>۲</sup> برای این منظور استفاده می‌شود و نتایج بدست آمده از هر دو نوع حسگر با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

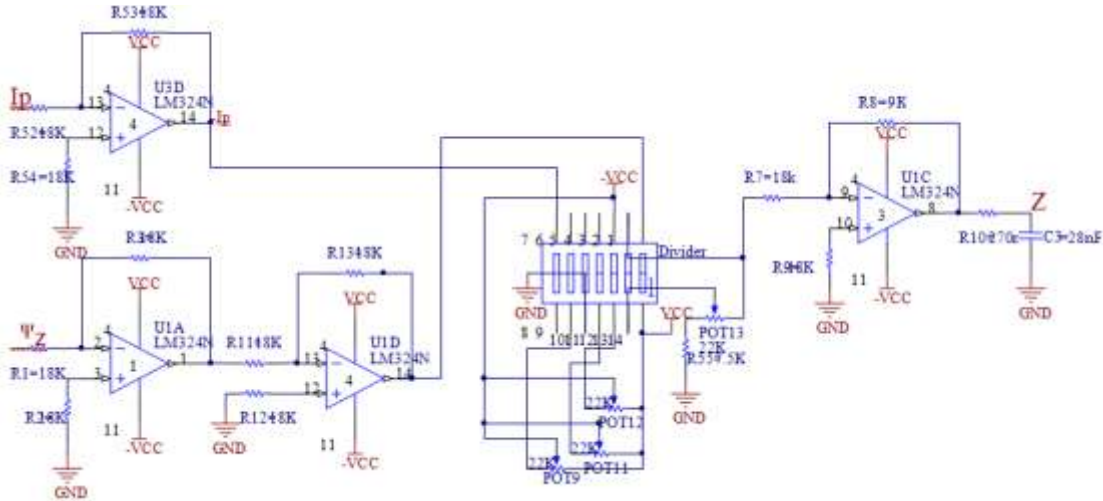
حسگرهای حلقه زینی مشتق شار میدان مغناطیسی قطبی میان زوج نقاط قرینه ( $\dot{\Psi}$ ) را اندازه‌گیری می‌کنند که این سیگنال از یک انتگرال‌گیر عبور می‌کند. برای این منظور از انتگرال‌گیرهای خود سیستم استفاده شده تا در همه داده‌ها انتگرال‌گیر یکسان باشد. تابع انتگرال‌گیر به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$H(s) = K \frac{1010}{s + 1.377} \quad (1-4)$$

1-Saddle Loop  
2-Magnetic probes

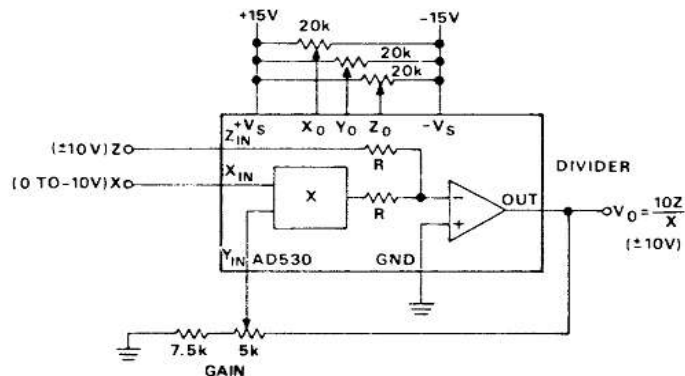
k قابل تنظیم و یکی از ضرایب {۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰} می‌باشد.

از طرفی حاصل تقسیم شار میدان ( $\Psi$ ) بر جریان پلاسما ( $I_p$ )، مکان پلاسما (Z) را می‌دهد که مداری به صورت شکل ۴-۱ برای این منظور طراحی گردید.



شکل ۴-۱: شماتیک مدار تقسیم‌کننده شار میدان ( $\Psi_Z$ ) بر جریان پلاسما

مدار به این صورت عمل می‌کند که شار میدان ( $\Psi_Z$ ) و جریان پلاسما ( $I_p$ ) را دریافت کرده و حاصل تقسیم آن‌ها را می‌دهد که برای این منظور از آی‌سی تقسیم‌کننده به نام AD530 استفاده شده است. البته این آی‌سی قابلیت ضرب و توان ۲ و جذر گرفتن را نیز دارا می‌باشد، که در حالت تقسیم‌کننده، مدار آن به شکل زیر می‌باشد:



شکل ۴-۲: مدار مربوط به تقسیم‌کننده آی‌سی AD530

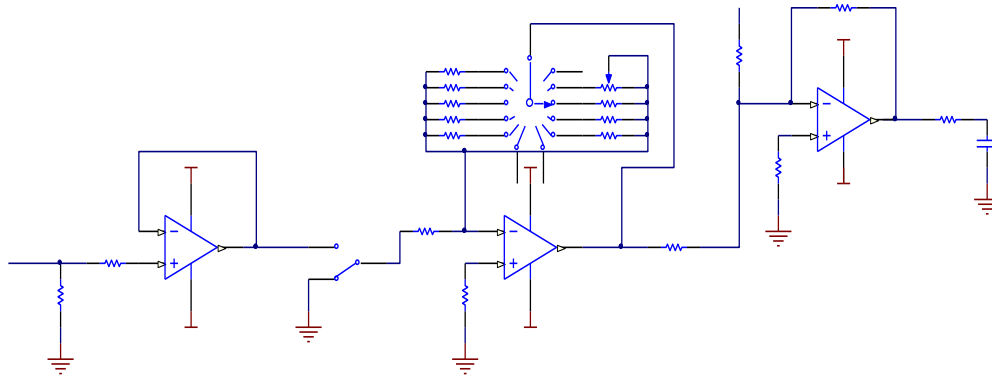
مطابق شکل ۴-۲ تقسیم‌کننده ورودی پایه ۱ را ۱۰ برابر کرده و بر ورودی پایه ۷ تقسیم می‌کند. با توجه به ساختار تقسیم‌کننده، باید ورودی پایه هفتم منفی باشد تا درست عمل کند بنابراین به

دلیل همواره مثبت بودن جریان پلاسما ( $I_p$ )، در یک قسمت از مدار  $I_p$  در منفی ضرب شده است. سیگنال‌های شار میدان ( $\Psi_Z$ ) و منفی جریان پلاسما ( $I_p$ ) به ترتیب به پایه اول و هفتم آی‌سی تقسیم‌کننده داده می‌شود. بنابراین خروجی تقسیم‌کننده ( $-1 \cdot Z$ ) می‌باشد. از طرفی در ساختار تقسیم‌کننده ۴ پتانسیومتر<sup>۱</sup> وجود دارد که برای عملکرد صحیح آی‌سی، نیاز است با دقت زیادی تنظیم گردند. برای این منظور ورودی‌های فرضی مختلف به دو پایه مورد نظر داده شد و حاصل تقسیم دو سیگنال توسط آی‌سی و اسیلوسکوپ با هم مقایسه گردیدند، با توجه به اینکه باید نتایج حاصل از هر دو تقسیم برهم منطبق شوند، مقادیر پتانسیومترها با دقت بالایی تنظیم شدند.

ماکزیمم مقدار جریان پلاسما  $40 \text{ KA}$  است که البته با توجه به انتگرال‌گیر و تقویت‌کننده مسیر آن، با ضریب  $10 \frac{\text{KA}}{\text{V}}$  نمایان می‌شود که در واقع در حالت ماکزیمم جریان پلاسما مقدار داده خروجی  $4 \text{ V}$  می‌باشد. از آنجایی که محدوده تغییرات  $\Psi$  با توجه به انتگرال‌گیر و تقویت‌کننده مسیر آن، به اندازه  $\pm 3 \text{ V}$  تنظیم شده است بنابراین حاصل تقسیم یعنی مقدار  $Z_p$  مقدار کوچکی می‌شود (در بیشینه  $(\frac{1.5}{4})$ )، که به دلیل کوچکی تأثیر زیادی از نویز گرفته و با دقت خوبی کنترل نمی‌شود. در مدار یک ضریب  $10$  در تقسیم‌کننده وجود دارد و در ادامه یک تضعیف‌کننده با گین  $\frac{1}{2}$  قرار داده شده تا  $5$  برابر  $Z_p$  را داشته باشیم که با نماد  $Z$  در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.

باتوجه به بلوک دیاگرام سیستم کنترل حلقه بسته که در بخش ۳-۴-۲ ارائه شد، باید سیگنال مکان عمودی مطلوب ( $Z_{ref}$ ) درست شود که اختلاف آن با  $Z_p$ ، سیگنال خطا ( $e$ ) را به کنترل‌کننده اعمال کند برای این منظور سیگنال  $Z_{ref}$  ورودی از مدارات دیگر توکامک که در محدوده  $\pm 1 \text{ V}$  است وارد مدار شکل ۴-۳ می‌شود و در محدوده با رزولوشن خوبی تقویت شده و در نهایت اختلاف آن با  $Z$  به عنوان سیگنال خطا ( $E$ ) درست می‌شود که شماتیک آن به صورت شکل ۴-۳ می‌باشد.

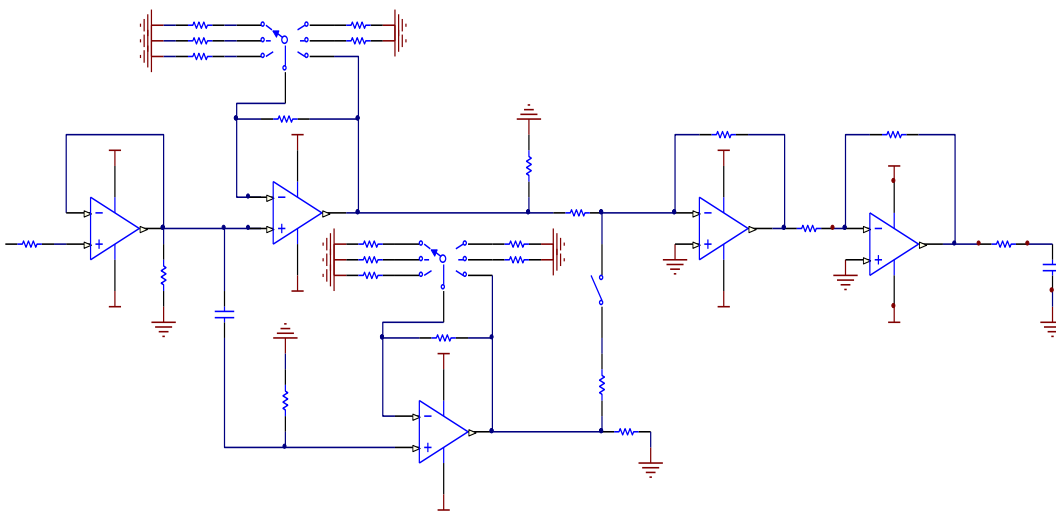
1-Potentiometer



شکل ۴-۳: شماتیک مدار محاسبه کننده خطای بین  $Z_P$  و  $Z_{ref}$

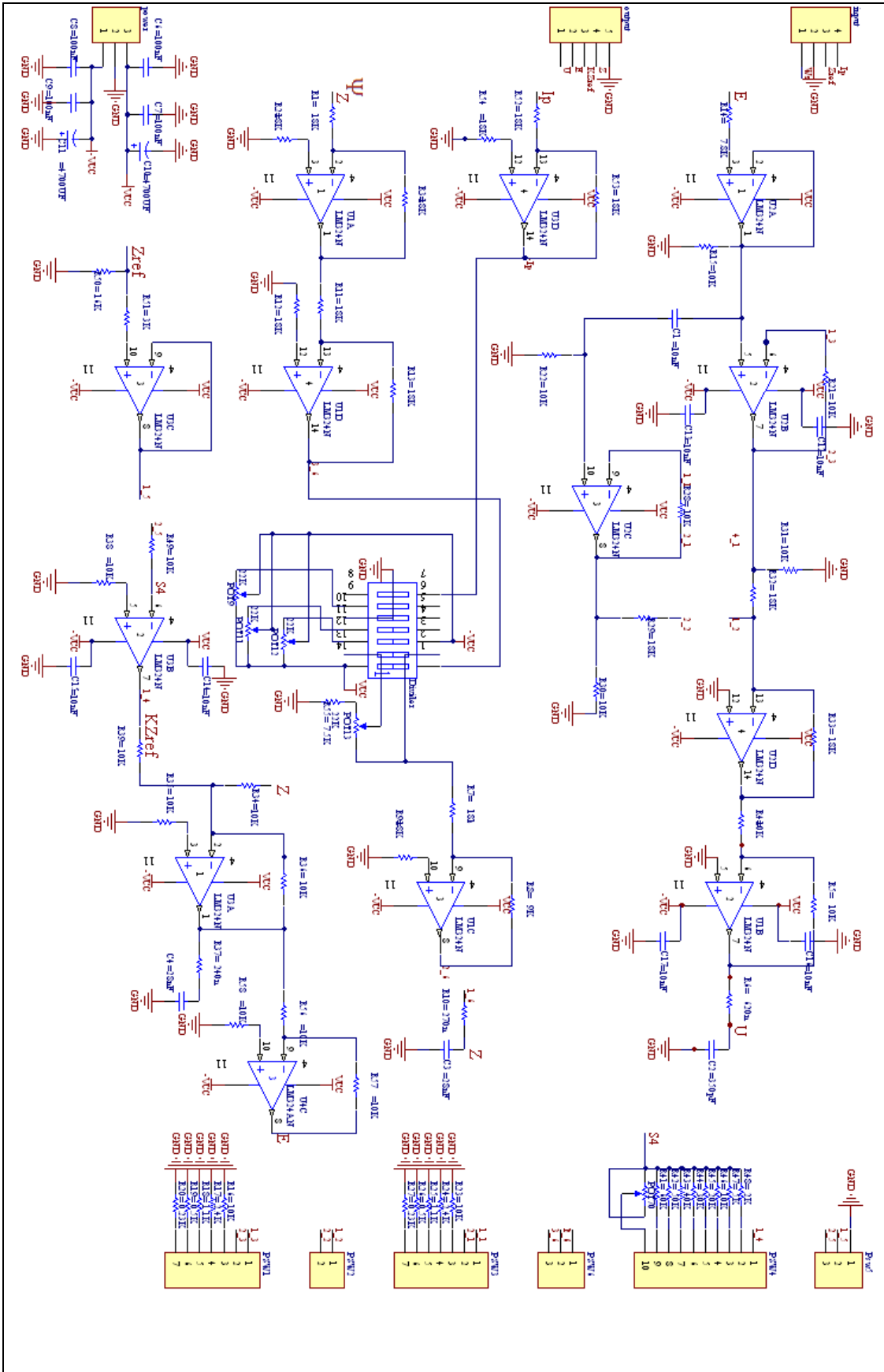
همچنین مدار کنترل کننده PD برای جابجایی عمودی پلازما طراحی شده که تابع تبدیل آن مطابق رابطه (۲-۴) و شماتیک آن به صورت شکل ۴-۴ است.

$$\frac{U}{E} = K_P + \frac{K_d S}{1000 + S} \quad (۲-۴)$$

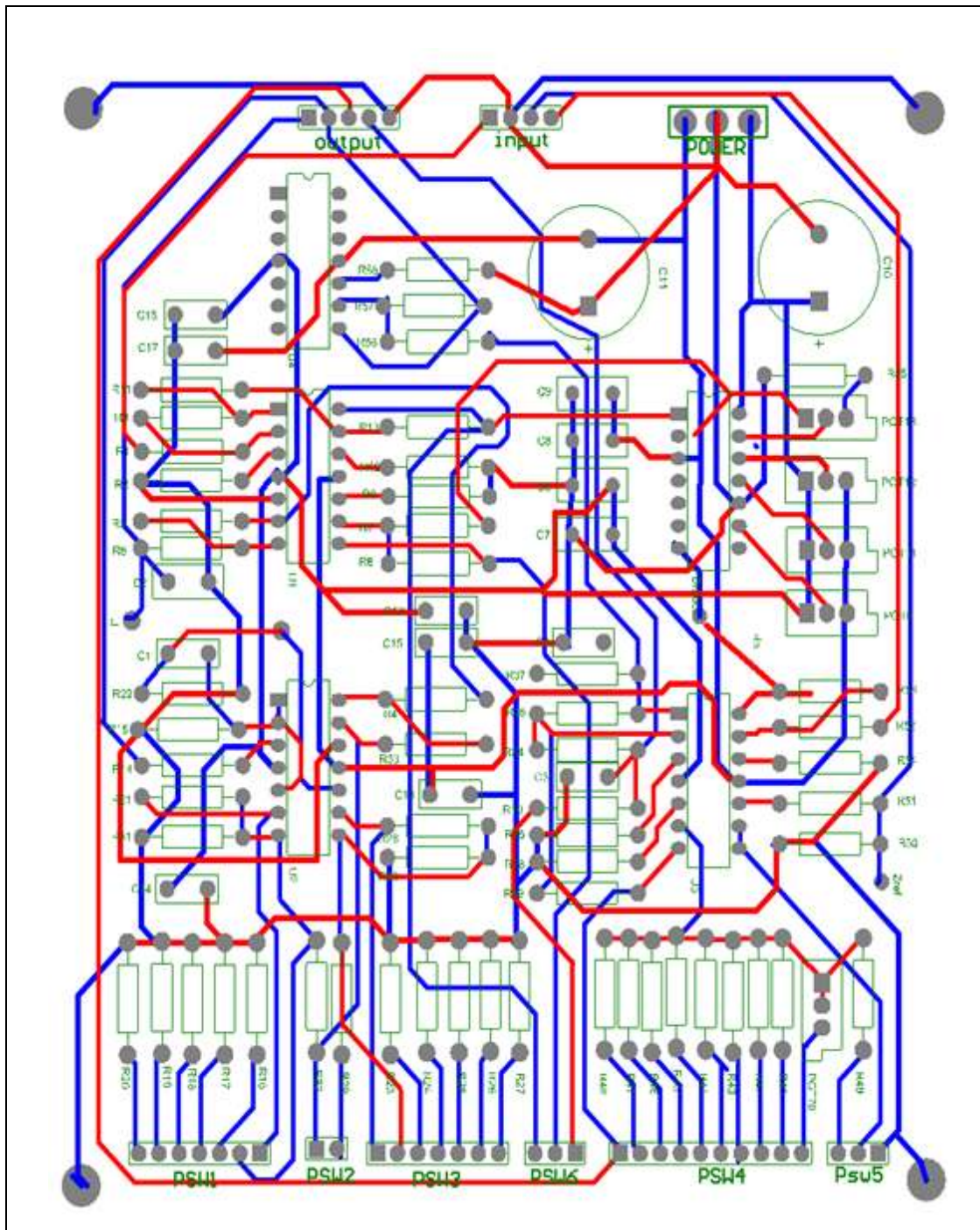


شکل ۴-۴: شماتیک مدار کنترل کننده PD

شماتیک کلی مدار طراحی شده برای منظوره‌های گفته شده در بالا تهیه شده و در ادامه کار PCB آن نیز طراحی شد که به ترتیب در شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ قابل مشاهده می‌باشد.

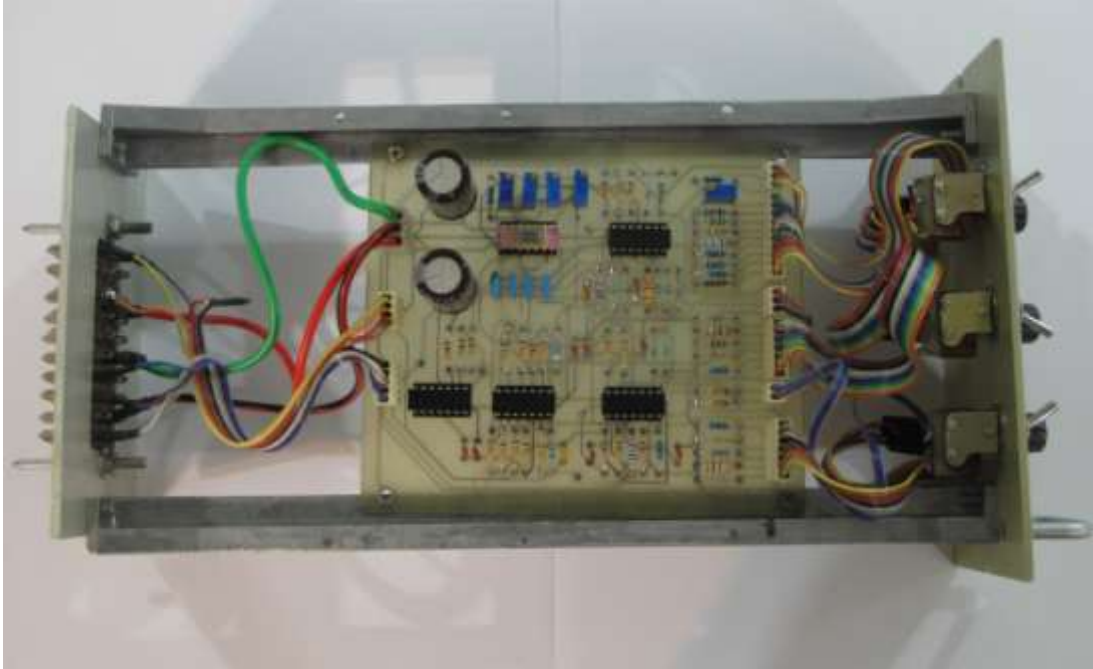


شکل ۴-۵: شماتیک کلی مدار اندازه‌گیر مکان عمودی پلازما و کنترل کننده PD



شکل ۴-۶: مدار اندازه‌گیر مکان عمودی پلاسما و کنترل کننده PD

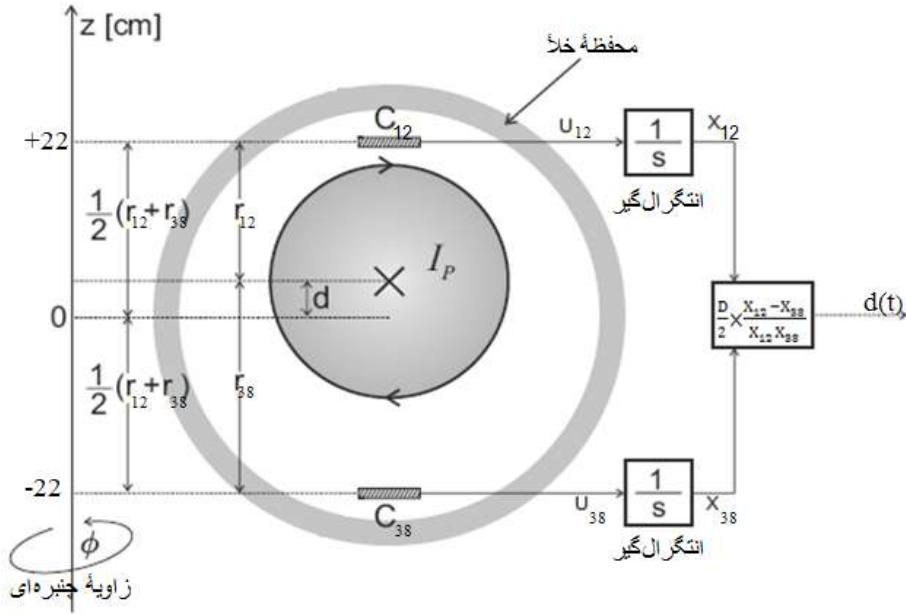
پس از مونتاژ قطعات و انجام تست‌های مربوطه، صحت عملکرد مدار تایید شد. در شکل ۷-۴ تصویری از برد تهیه شده نشان داده شده است.



شکل ۷-۴: تصویر برد مونتاژ شده مدار اندازه‌گیر مکان عمودی پلازما و کنترل‌کننده PD

#### ۴-۳ استفاده از حسگرهای مغناطیسی:

موضوع اصلی شامل اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده توسط جریان پلازما ( $I_p$ ) در دو موقعیت عمودی محور  $Z$  ( $Z = \pm 22$ ) است. هر چند سطح مقطع پلازما در توکامک دماوند،  $D$  شکل می‌باشد ولی به دلیل تقارن در راستای عمودی با تقریب خوبی روابط با حالتی که سطح مقطع دایروی است، یکسان است. در شکل ۸-۴ نمایی از موقعیت پلازما در سطح مقطع دایروی نشان داده شده است.



شکل ۴-۸: یافتن موقعیت عمودی با استفاده از دو حسگر مغناطیسی [۲۸]

سیگنال خروجی تابعی از موقعیت عمودی پلاسما است که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. میدان‌های مغناطیسی که بوسیله جریان پلاسما ( $I_P$ ) در سیم‌پیچ‌های  $C_{38}$  و  $C_{12}$  تولید شده‌اند از روابط (۴-۳) و (۴-۴) بدست می‌آیند.

$$B_{12} = \frac{\mu_0 I_P}{2\pi r_{12}(t)} \quad (۳-۴)$$

$$B_{38} = \frac{\mu_0 I_P}{2\pi r_{38}(t)} \quad (۴-۴)$$

در آن  $r_{12}$  و  $r_{38}$  به ترتیب فاصله سیم پیچ‌های  $C_{12}$  و  $C_{38}$  از مرکز پلاسما می‌باشد.

جابجایی عمودی پلاسما از مرکز محفظه ( $d$ ) با رابطه (۴-۵) بدست می‌آید.

$$d(t) = r_{38}(t) - \frac{1}{2}(r_{38}(t) + r_{12}(t)) = \frac{1}{2}(r_{38}(t) - r_{12}(t)) \quad (۵-۴)$$

ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ‌های  $C_{12}$  و  $C_{38}$  نیز از روابط (۴-۶) و (۴-۷) بدست می‌آیند.

$$U_{12} = -NA \frac{dB_{12}}{dt} \quad (۶-۴)$$



$$U_{38} = -NA \frac{dB_{38}}{dt} \quad (۷-۴)$$

که در آن  $N$  تعداد دور سیم پیچ و  $A$  سطح مقطع آن (همه حلقه‌های سیم پیچ یکسان هستند) می‌باشد. برای تبدیل ولتاژ سنسورها ( $U$ ) به سیگنال مورد نظر از انتگرال‌گیر استفاده شده است و روابط خروجی سنسورها پس از عبور از انتگرال‌گیر به صورت زیر می‌باشد.

$$X_{12}(t) = G \int U_{12}(t) dt = GNAB_{12}(t) = D \frac{1}{r_{12}(t)} \quad (۸-۴)$$

$$X_{38}(t) = G \int U_{38}(t) dt = GNAB_{38}(t) = D \frac{1}{r_{38}(t)} \quad (۹-۴)$$

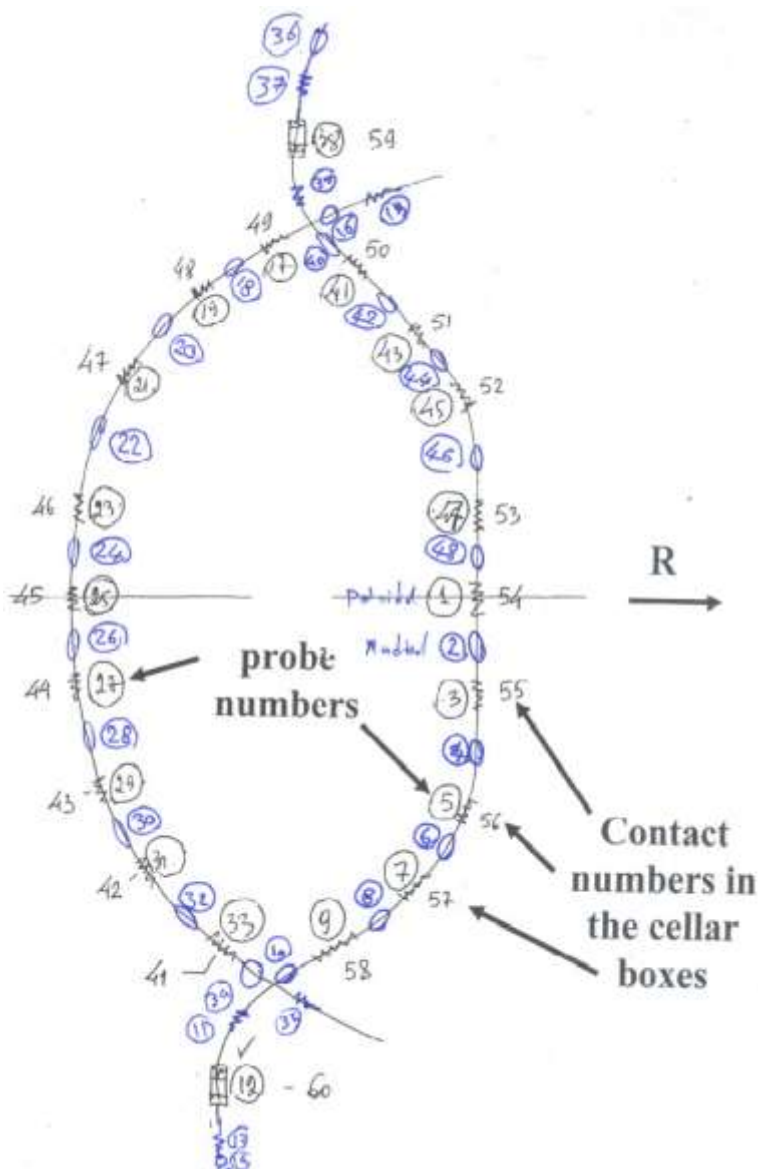
در آن  $G$  گین انتگرال‌گیر و  $D$  مقدار ثابت برابر  $\frac{GNA\mu_0 I_p}{2\pi}$  است. بنابراین با توجه با روابط بالا جابجایی مطلق پلاسما از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸].

$$d(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{X_{38}} - \frac{D}{X_{12}} \right) = \frac{D}{2} \times \left( \frac{X_{12} - X_{38}}{X_{12} X_{38}} \right) \quad (۱۰-۴)$$

برای محاسبه  $D$  باید مقدار  $GNA$  را داشته باشیم که در بخش ۴-۵ آن را محاسبه می‌کنیم.

#### ۴ ۴ تعیین محل حسگرهای مغناطیسی

همانطور که بیان شد با اندازه‌گیری میدان‌های قطبی بوسیله حسگرهای مغناطیسی می‌توان مکان پلاسما را تعیین کرد. البته علاوه بر حسگرهای پلوئیدالی دو تا از حسگرهای شعاعی نیز به دلیل نحوه قرارگرفتن‌شان میدان پلوئیدالی را اندازه‌گیری می‌کنند که از داده‌های آن‌ها نیز استفاده شده است. در توکامک دماوند محل قرارگیری حسگرها تاکنون مطابق شکل ۴-۹ در اسناد اولیه دستگاه موجود بوده است.



شکل ۴-۹: نقشه قدیم نحوه قرار گرفتن حسگرهای مغناطیسی در توکامک دماوند

طبق بررسی‌های اولیه، شماره حسگرهای مغناطیسی و آنتگرال‌گیرهای مربوطه، مطابق جدول ۴-۱

می‌باشد.

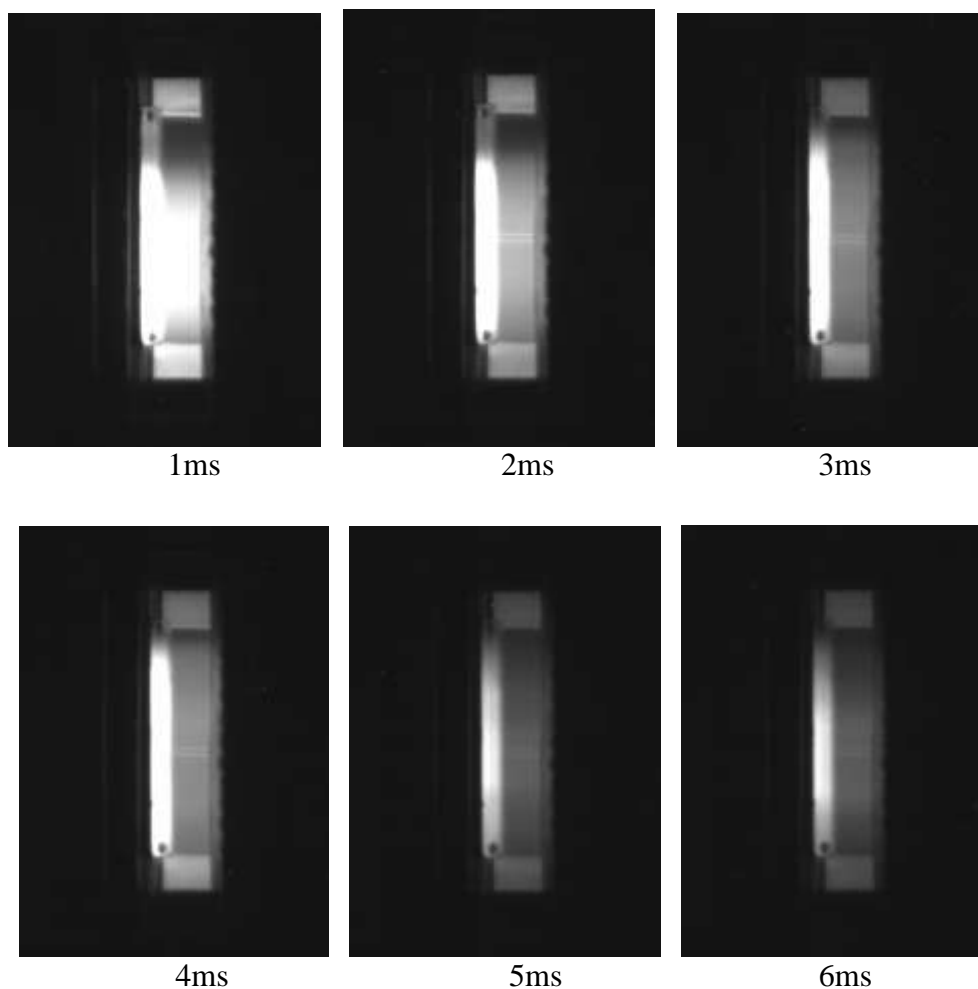
جدول ۴-۱: شماره حسگرهای مغناطیسی و انتگرال‌گیرهای مربوطه

شماره انتگرال‌گیر با ثابت زمانی 1ms	شماره حسگرهای مغناطیسی	
۵۴	۱	ناحیه قسمت پایین بیرونی
۳۹	۳	
۵۶	۵	
۵۷	۷	
۵۸	۹	
—	۱۱	ناحیه قسمت پایین کم اهمیت
—	۱۳	
—	۳۵	
—	۱۵	ناحیه قسمت بالا کم اهمیت
—	۳۷	
—	۳۹	
۴۹	۱۷	ناحیه قسمت بالایی درونی
۴۸	۱۹	
۴۷	۲۱	
۴۶	۲۳	
۴۵	۲۵	
۴۴	۲۷	ناحیه قسمت پایین داخلی
۴۳	۲۹	
۴۲	۳۱	
۴۱	۳۳	
۵۰	۴۱	ناحیه قسمت بالایی بیرونی
۵۱	۴۳	
۵۲	۴۵	
۵۳	۴۷	
۵۹	۳۸	حسگرهای شعاعی
۶۰	۱۲	

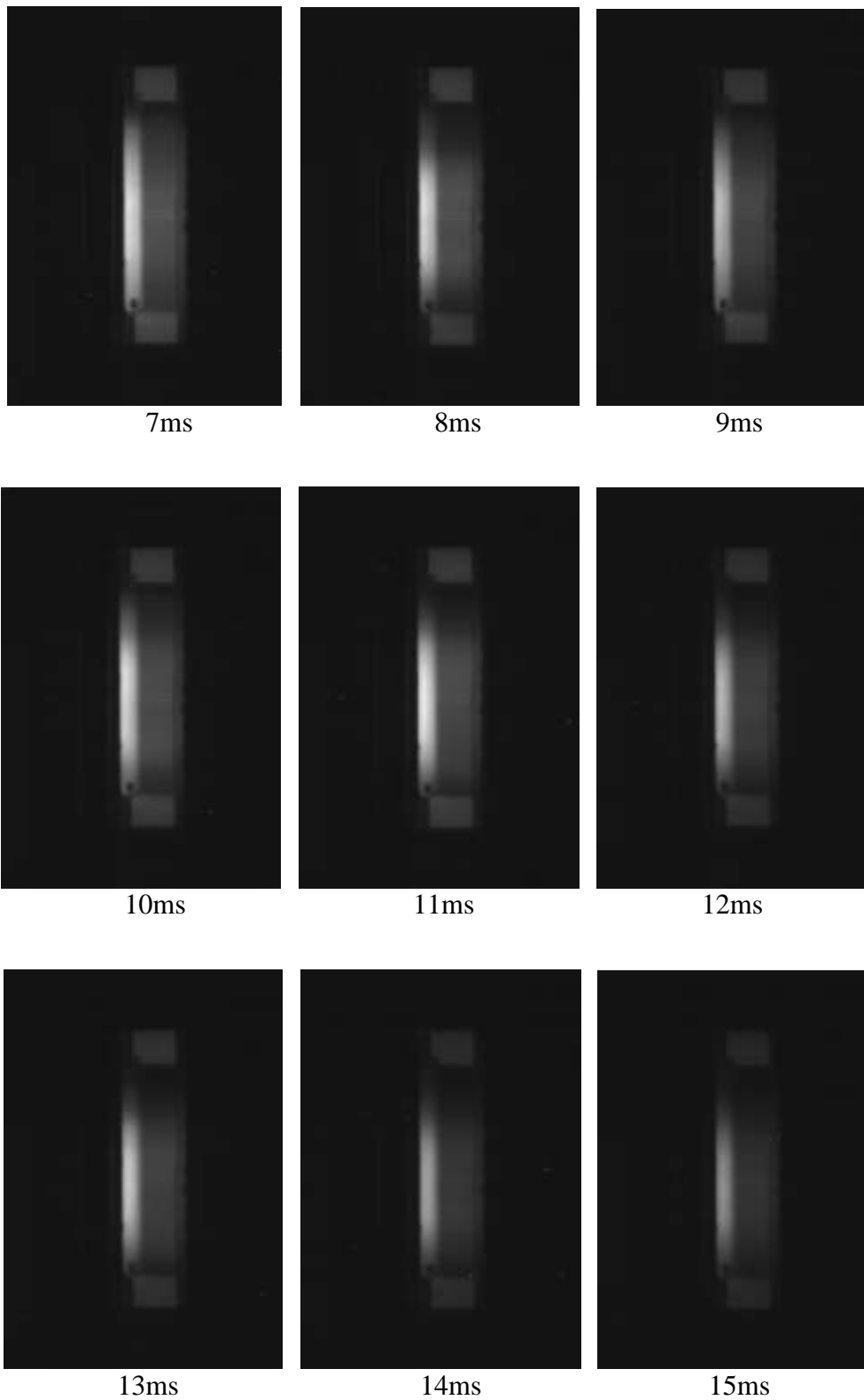
دانستن محل دقیق حسگرها برای استفاده میدان‌های قطبی بدست آمده با توجه به محل اندازه‌گیری آن‌ها، در تحلیل دقیق داده‌های بدست آمده از حسگرهای مغناطیسی امری ضروری می‌باشد. از طرفی باز کردن محفظه خلأ و اندازه‌گیری محل دقیق آن‌ها مشکلات اجرایی زیادی دارد.

بنابراین برای حصول اطمینان از صحت نقشه موجود، داده‌های حسگرهای مغناطیسی تحلیل گردیده و با نتایج حاصل از تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera مقایسه شد. به این

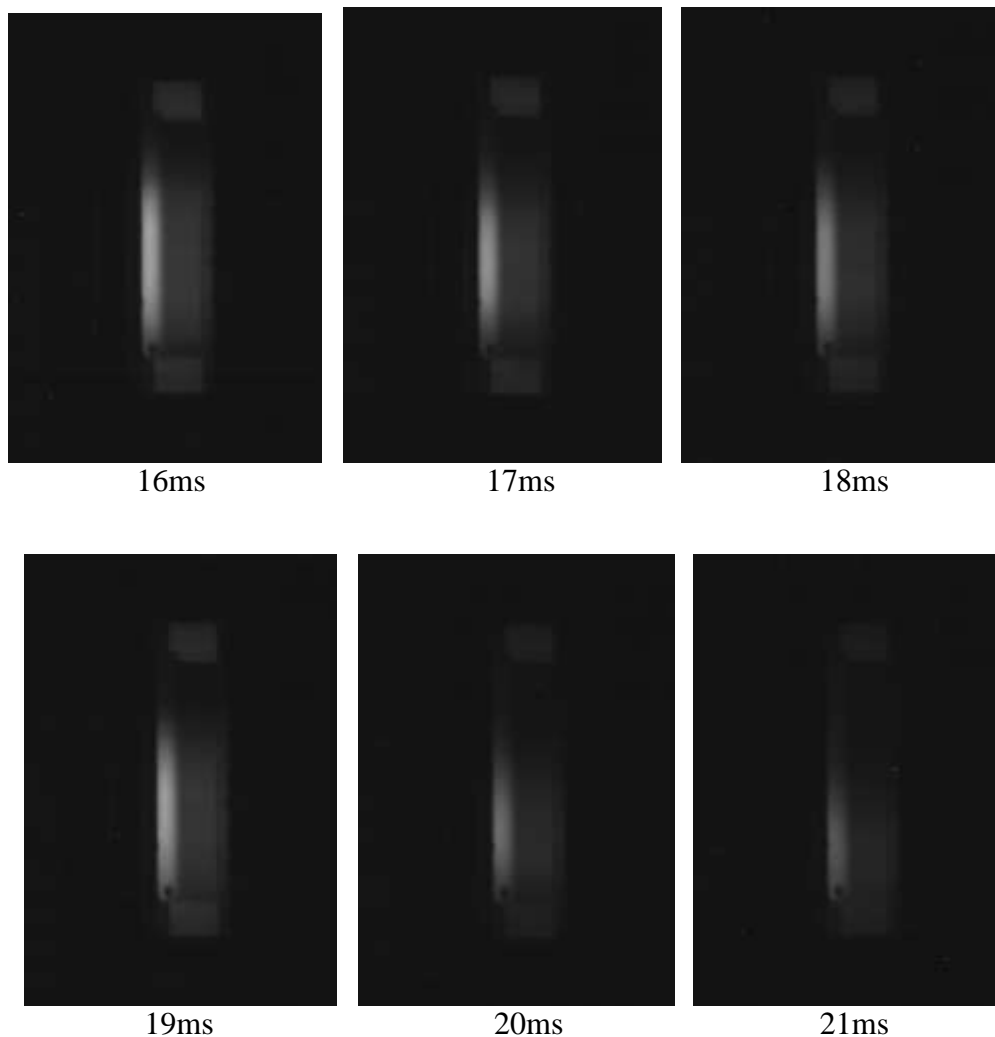
صورت که سیستم را در حالت بدون کنترل مکان عمودی تخلیه الکتریکی کرده و با توجه به اینکه پهنای زمانی تولید پلاسما در حدود ۲۱ms می‌باشد، به تعداد ۲۱ شات یکسان تخلیه الکتریکی انجام شد که در هر شات ۱ms از پلاسما به طور متوالی عکسبرداری گردید. در نتیجه به دلیل یکسان بودن تقریبی شات‌ها و بررسی توالی حرکت پلاسما، طبق تصاویر بدست آمده مشخص گردید که پلاسما در حالت بدون کنترل، از لحظه تشکیل به مرور به سمت پایین محفظه حرکت می‌کند که این حرکت در زمان‌های آخر سریعتر صورت می‌گیرد که این نتیجه مطابق با نمودار شکل ۳-۶ می‌باشد که در آن پلاسمای بدون کنترل به سمت پایین محفظه حرکت می‌کند. در شکل ۴-۱۰، شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ تصاویر بدست آمده برای بازه زمانی ۲۱ms به صورت نمونه آورده شده است.



شکل ۴-۱۰: تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera برای میلی‌ثانیه اول تا ششم تشکیل پلاسما

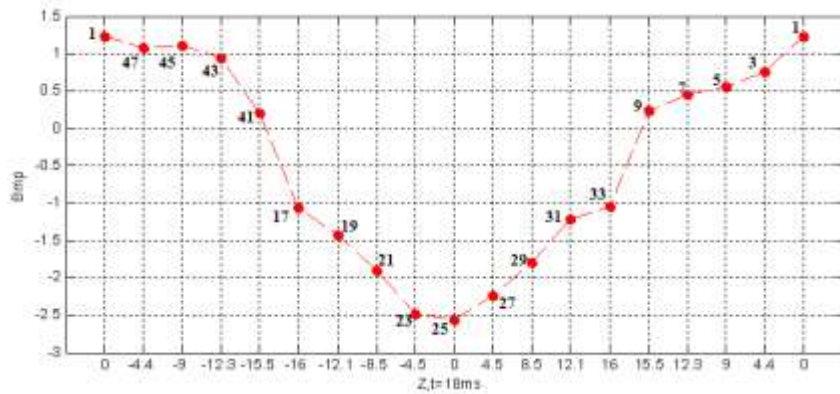


شکل ۴-۱۱: تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera برای میلی‌ثانیه هفتم تا پانزدهم تشکیل پلاسما

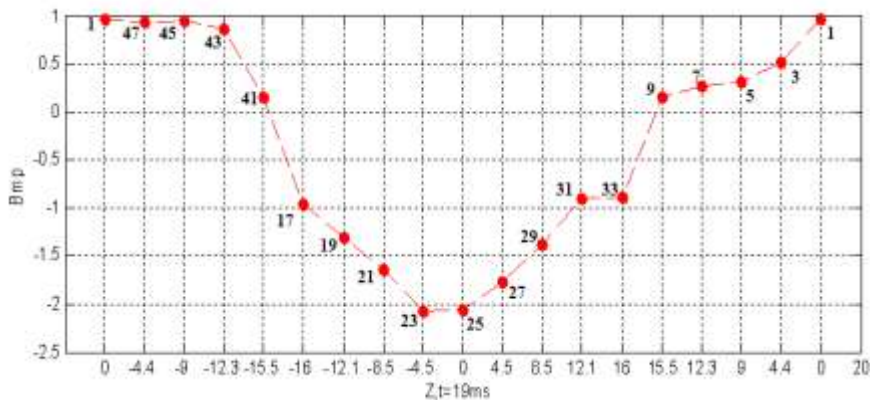


شکل ۴-۱۲: تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera برای میلی ثانیه شانزدهم تا بیست و یکم تشکیل پلازما در ادامه تحلیل و مقایسه، نمودار مربوط به مقادیر حسگرها برحسب موقعیت عمودی با فاصله زمانی ۱ms از زمان ۱۸ms تا اتمام پلازما در شکل ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ آورده شده است. بدیهی است وقتی پلازما حرکت می‌کند با نزدیک شدن به ناحیه‌ای، میدان در آن ناحیه زیاد شده و خروجی حسگرهای قرار گرفته در آن ناحیه مقدار بیشتری را نشان می‌دهد و در نتیجه دور شدن از گروهی دیگر از حسگرها، خروجی آنها مقدار کمتری را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودارهای شکل ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ دیده می‌شود با گذشت زمان، حسگرهایی که در پایین محفظه قرار دارند مانند حسگرهای شماره ۳۳ و ۷ به ترتیب نسبت به حسگرهایی که در بالای محفظه در همان فاصله قرار دارند مانند حسگرهای شماره ۱۷ و ۴۳ مقدارشان کمتر است. برای وضوح بیشتر نمودار مقادیر

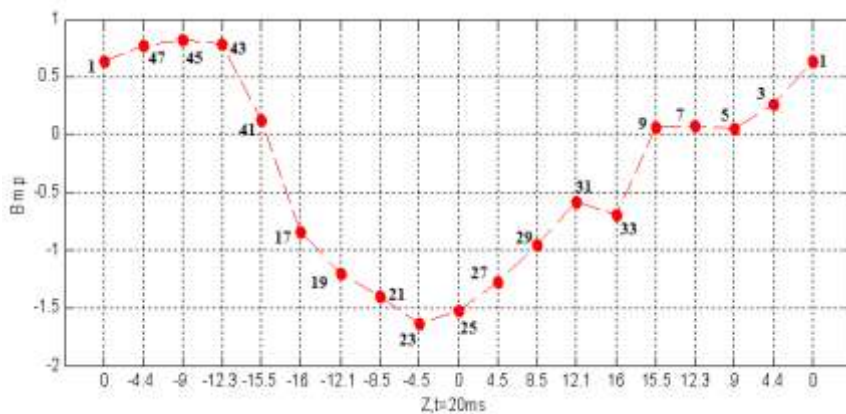
مربوط به حسگرهای ۴۳ و ۷ که به ترتیب در بالا و پایین محفظه قرار دارند در کل بازه زمانی ۲۲ms در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است که با توجه به آن حسگر شماره ۴۳ مقدارش بیشتر می‌باشد. بنابراین با دقت در کلیه نمودارها مشخص می‌شود که داده‌های این حسگرها نشان می‌دهد که پلاسما به سمت بالا حرکت کرده است.



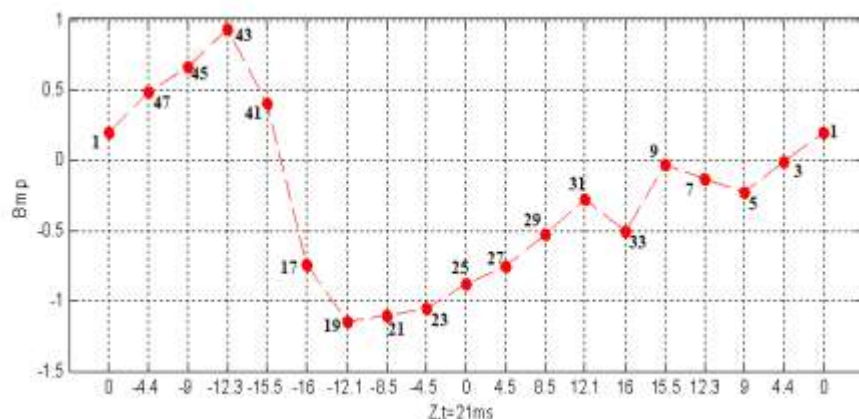
شکل ۴-۱۳: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۱۸ms بعد از تشکیل پلاسما



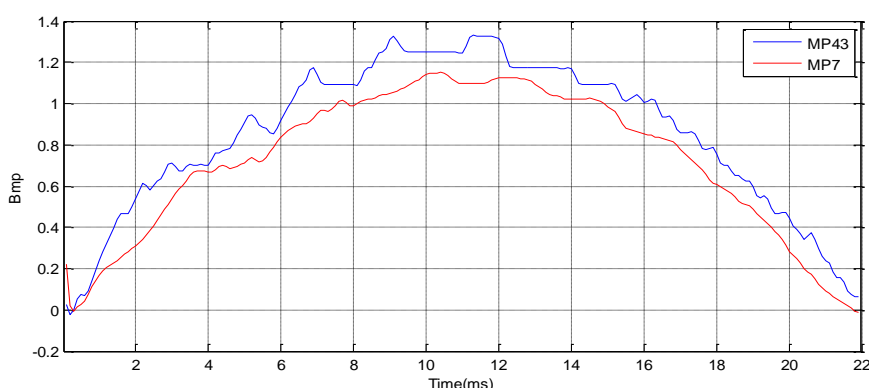
شکل ۴-۱۴: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۱۹ms بعد از تشکیل پلاسما



شکل ۴-۱۵: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۲۰ms بعد از تشکیل پلاسما



شکل ۴-۱۶: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۲۱ms بعد از تشکیل پلاسما

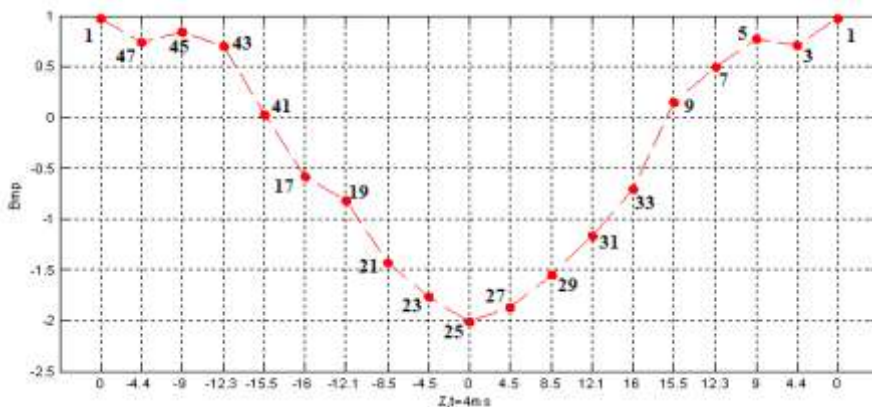


شکل ۴-۱۷: مقادیر حسگرهای شماره ۴۳ و ۷

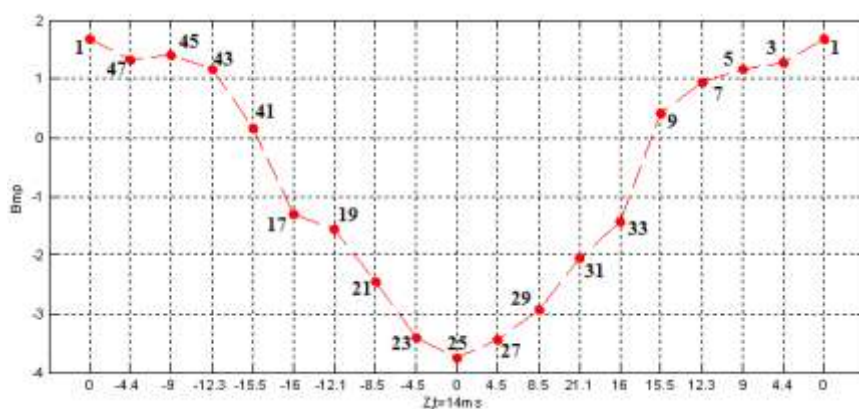
برای چندین شات متفاوت نمودار داده‌ها رسم و تحلیل شدند که همگی همین نتیجه را نشان دادند. در نهایت با توجه به درست بودن تصاویر بدست آمده از دوربین CCD Camera، این نتیجه حاصل شد که نقشه داده شده توسط روس‌ها صحیح نمی‌باشد.

البته برای حصول اطمینان بیشتر، داده‌های مربوط به تست‌هایی که مکان پلاسما در آن‌ها کنترل شده بود نیز بررسی شد که برای نمونه داده‌های مربوط به زمان‌های مختلف یک تست در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ آورده شده است که همان طور که در شکل ۴-۲۰ نمایان است، مکان قرارگیری پلاسما ۲ms پس از تشکیل آن، پایین‌تر از مرکز محفظه می‌باشد. در صورتی که مطابق نمودارها حسگرهایی که در قسمت پایین محفظه قرار دارند مانند حسگرهای شماره ۳۳ و ۷ به ترتیب نسبت به حسگرهایی که در بالای محفظه در همان فاصله قرار دارند مانند حسگرهای شماره ۱۷ و ۴۳ مقدارشان کمتر است.

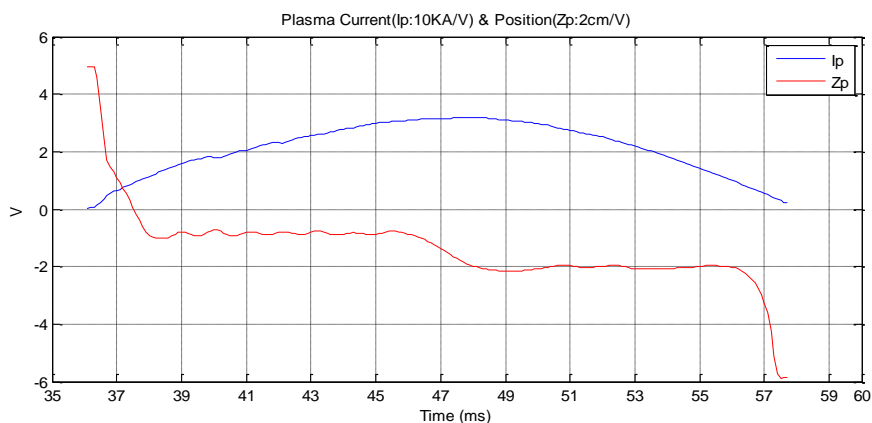




شکل ۴-۱۸: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۴ms بعد از تشکیل پلازما



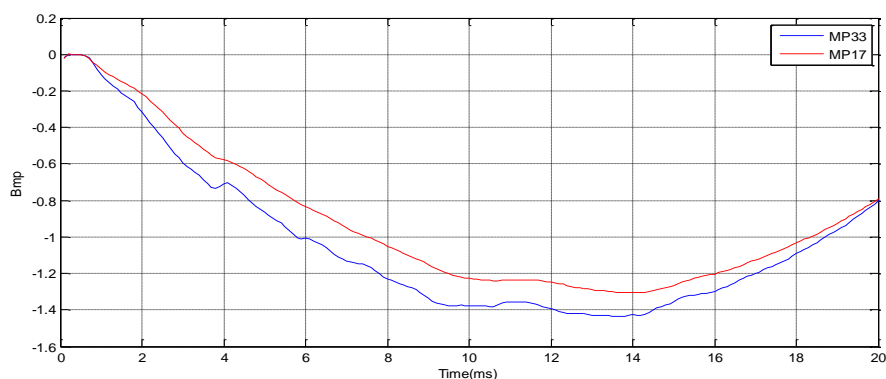
شکل ۴-۱۹: مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی ۱۴ms بعد از تشکیل پلازما



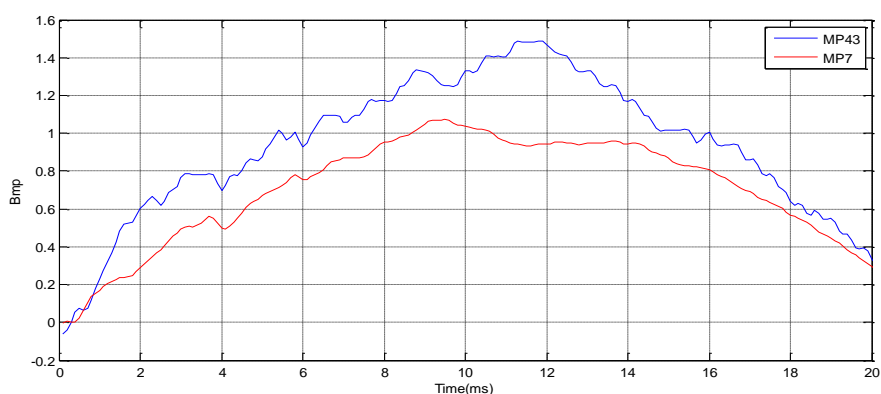
شکل ۴-۲۰: نمودار جریان و مکان عمودی پلازما

در نهایت نمودارهای مربوط به ۴ حسگر در بالا و پایین محفظه در شکل ۴-۲۱ و شکل ۴-۲۲ نیز

نشان داده شده است که نتایج قبلی را تأیید می‌کنند.



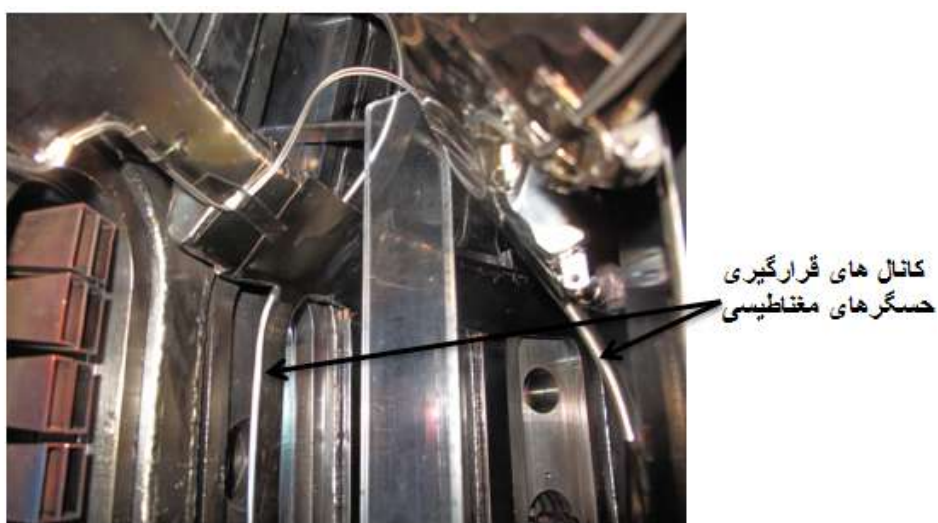
شکل ۴-۲۱: مقادیر حسگرهای شماره ۴۳ و ۷



شکل ۴-۲۲: مقادیر حسگرهای شماره ۴۳ و ۷

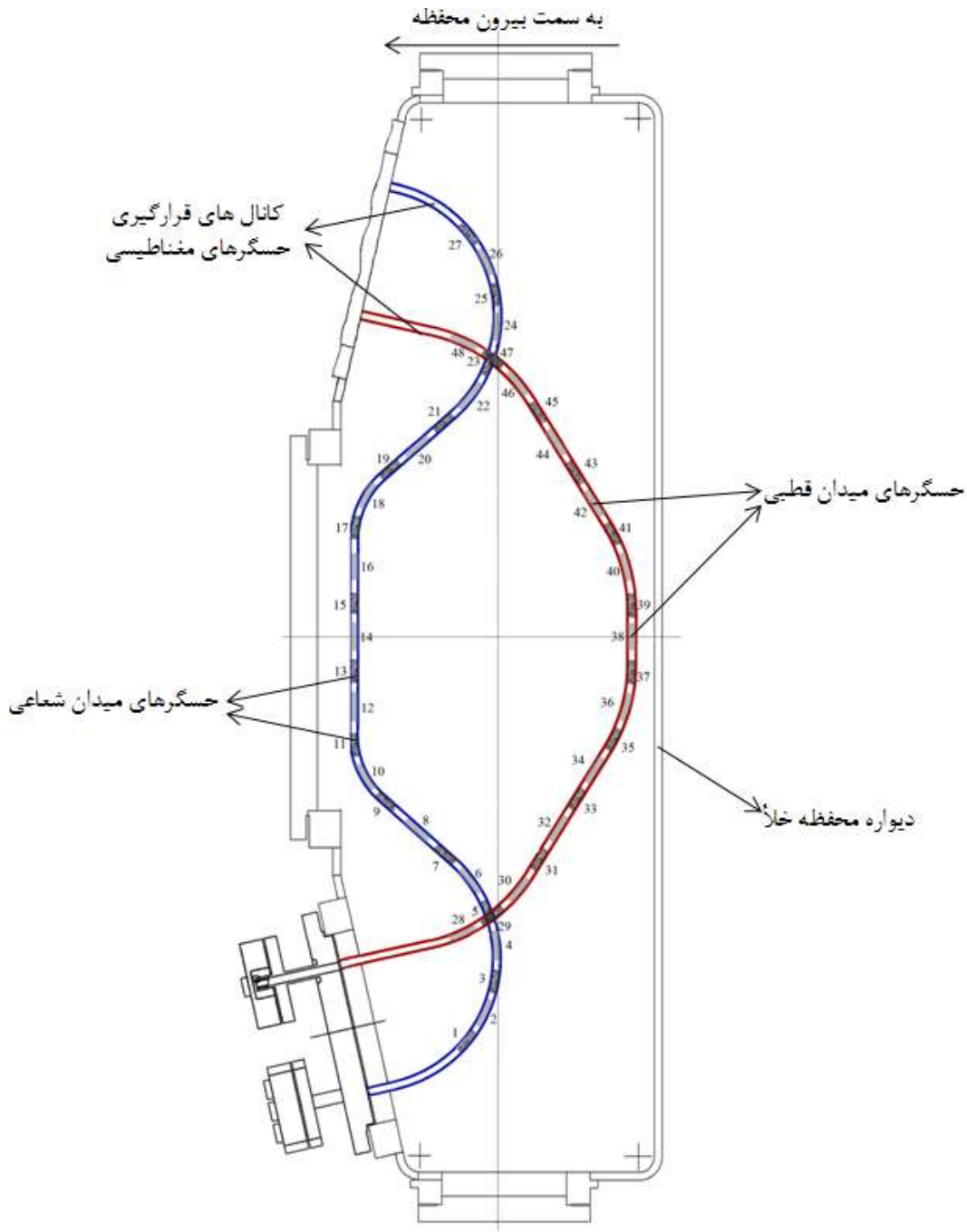
بنابراین با وجود همه مشکلات به ناچار خلأ سیستم شکسته شد. تصویر نیمه بالایی کانال‌های

قرارگیری حسگرهای مغناطیسی در داخل توکامک دماوند در شکل ۴-۲۳ آورده شده است.



شکل ۴-۲۳: تصویر نیمه بالایی کانال‌های قرارگیری حسگرهای مغناطیسی در داخل توکامک دماوند

با انجام آزمایش روی تک تک پروب‌ها مشخص شد که نقشه در راستای عمودی قرینه بوده است. نقشه صحیح مکان حسگرها به صورت شکل ۴-۲۴ می‌باشد البته نامگذاری حسگرها مجدداً انجام پذیرفت. با در نظر گرفتن این ترتیب تحلیل داده‌های حسگرهای مغناطیسی نیز موقعیت واقعی پلازما را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۴: نقشه اصلاح شده نحوه قرار گرفتن حسگرهای مغناطیسی در توکامک دماوند

مکان قرارگیری هر یک از سنسورها به صورت دقیق در راستای افق و عمود اندازه‌گیری شد که مقادیر مختصات محل قرارگیری آن‌ها بر اساس شماره‌گذاری جدید و قدیم در جدول ۲-۴ و جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۴: مقادیر مختصات محل قرارگیری حسگرهای مغناطیسی شماره ۱ تا ۲۴ بر حسب سانتی‌متر

شماره گذاری جدید	شماره گذاری قدیم	فاصله افقی (y)	فاصله عمودی (z)
1	36	+1.8	-25.5
2	37	+0.9	-24
3	38	+0.2	-22
4	39	+0.08	-19.5
5	40	+0.6	-17.5
6	41	+1.7	-15.5
7	42	+3.4	-14.5
8	43	+5	-12.3
9	44	+7.3	-10.6
10	45	+8.5	-9
11	46	+9.2	-6.8
12	47	+9.2	-4.4
13	48	+9.2	-2
14	1	+9.2	0
15	2	+9.2	+2
16	3	+9.2	+4.4
17	4	+9.2	+6.8
18	5	+8.5	+9
19	6	+7.3	+10.6
20	7	+5	+12.3
21	8	+3.4	+14.5
22	9	+1.7	+15.5
23	10	+0.6	+17.5
24	11	+0.08	+19.5

جدول ۳-۴: مقادیر مختصات محل قرارگیری حسگرهای مغناطیسی شماره ۲۵ تا ۴۸ بر حسب سانتی‌متر

شماره گذاری جدید	شماره گذاری قدیم	فاصله افقی (y)	فاصله عمودی (z)
25	12	+0.2	+22
26	13	+0.9	+24
27	14	+1.8	+25.5
28	15	+2.3	-18.7
29	16	+0.4	-17.8
30	17	-1.2	-16
31	18	-2.6	-14.1
32	19	-4	-12.1
33	20	-5	-10.4
34	21	-6.2	-8.5
35	22	-7.4	-6.5
36	23	-8.2	-4.5
37	24	-8.6	-2.3
38	25	-8.6	0
39	26	-8.6	+2.3
40	27	-8.2	+4.5
41	28	-7.4	+6.5
42	29	-6.2	+8.5
43	30	-5	+10.4
44	31	-4	+12.1
45	32	-2.6	+14.1
46	33	-1.2	+16
47	34	+0.4	+17.8
48	35	+2.3	+18.7

از آنجائیکه هیچ ضریب کالیبره‌ای برای حسگرهای مغناطیسی از طرف روس‌ها ارائه نشده است و برای تحلیل داده‌ها و شناسایی مدل سیستم لازم بود که حسگرهای مغناطیسی کالیبره شوند در ادامه با طراحی آزمایشی، ضریب کالیبره این حسگرها بدست آمد.

#### ۴ محاسبه ضریب کالیبراسیون حسگرهای مغناطیسی:

برای بدست آوردن جابجایی مکان عمودی از محاسبه میدان توسط حسگرهای مغناطیسی در نقاط مختلف استفاده خواهد شد [۱۱] و [۲۲] و [۲۶]. برای تحلیل خروجی حسگرهای مغناطیسی و در نتیجه استفاده از مقدار میدان مغناطیسی قطبی اندازه‌گیری شده، بدست آوردن ضریب کالیبراسیون این حسگرها امری ضروری می‌باشد. بنابراین آزمایشی برای این منظور طراحی شده است.

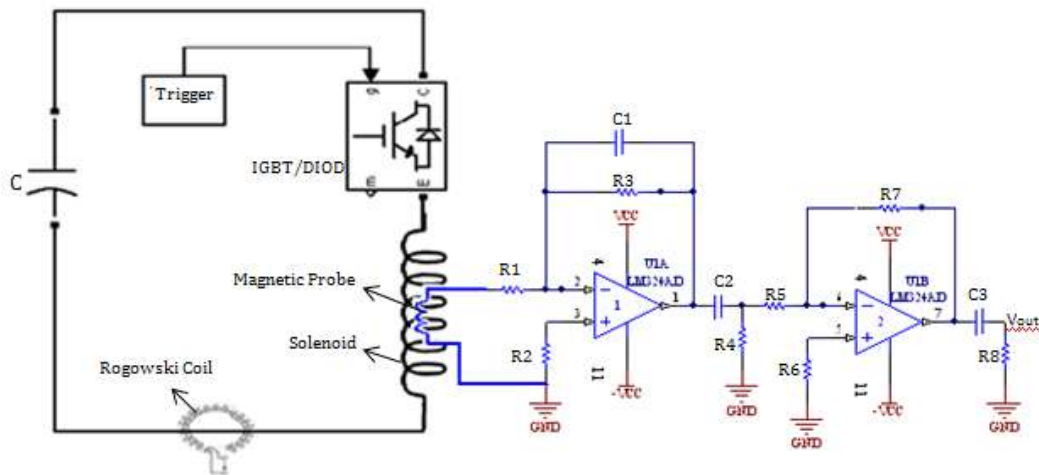
مطابق قانون فاراد میدان مغناطیسی متغیر عبوری از مرکز سیم‌پیچ، ولتاژی را در آن القا می‌کند و از آنجایی که حسگرهای مغناطیسی خود سیم پیچ هستند رابطه خروجی آن‌ها با میدان گذرنده از مرکزشان مطابق رابطه (۴-۱۱) است که در آن  $B$  میدان در مرکز سیم‌پیچ،  $V$  ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ،  $N$  تعداد دور و  $A$  سطح مقطع سیم‌پیچ است.

$$B = -\frac{1}{NA} \int V. dt \quad (4-11)$$

با مشخص شدن ضرایب این رابطه می‌توان میدان قطبی در اطراف پلاسما را به صورت محلی و نقطه‌ای با استفاده از این حسگرها تعیین نمود. برای تعیین این ضرایب مداری که شماتیک آن در شکل ۴-۲۵ آورده شده است، طراحی شد که در آن جریان متغییری توسط بانک خازنی و سوئیچ IGBT ایجاد گردیده و از سیملوله با ابعاد مشخص عبور داده شد. 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 (۴-۱۲) بدست آورد:

$$B = \mu_0 nI \quad (12-4)$$

در آن  $\mu_0$  ضریب نفوذپذیری،  $n$  تعداد دور بر واحد طول و  $I$  جریان گذرنده از سیملوله می‌باشد. برای اندازه‌گیری جریان  $I$  از کویل روگوفسکی استفاده گردید.



شکل ۴-۲۵: مدار طراحی شده به منظور محاسبه‌ی ضریب کالیبراسیون سنسورهای مغناطیسی

از طرفی با قرار دادن حسگر مغناطیسی در داخل سیملوله برای اندازه‌گیری میدان ایجاد شده در مرکز آن و عبور سیگنال خروجی حسگر از انتگرال‌گیر و تقویت‌کننده با بهره<sup>۱</sup> قابل تنظیم  $G$ ، میدان اندازه‌گیری شده در مرکز سیم‌پیچ که با توجه به تنظیمات همان مرکز سیملوله می‌باشد مطابق رابطه زیر است.

$$B = \frac{1}{RCNA} \times \frac{V_{out}}{G} \quad (13-4)$$

که در آن  $V_{out}$  خروجی تقویت‌کننده است. با جایگذاری رابطه (۱۲-۴) در رابطه (۱۳-۴) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{RCNA} = \frac{\mu_0 nIG}{V_{out}} \quad (14-4)$$

طرف اول رابطه (۴-۱۴) با جایگذاری اعداد در طرف دوم آن بدست می‌آید. مقدار  $\frac{1}{RCNA}$  ضریب کالیبراسیون  $K$  نامیده شده که با معلوم بودن  $\mu_0$ ،  $n$ ،  $I$ ،  $G$  و  $V_{out}$ ، ضریب کالیبراسیون تعیین می‌گردد.

آزمایش طراحی شده چندین مرحله با دو سیملوله مختلف از نظر ابعاد و با مقادیر مختلف بهره تقویت‌کننده و ولتاژ اولیه مختلف بانک خازنی که منجر به جریان‌های بیشینه مختلفی می‌شود، انجام شد. شرایط مربوط به تکرار آزمایش و ضریب کالیبراسیون بدست آمده در هر تست به صورت ارائه شده در جدول ۴-۴ است.

جدول ۴-۴: مقدارهای ضریب کالیبراسیون حسگرهای مغناطیسی در شرایط مختلف آزمایش

ضریب کالیبراسیون (K)	ولتاژ اولیه (V)	مقدار گین تقویت‌کننده	شماره تست
۱۴۱۵/۸۴	۴۰	۵	۱
۱۳۹۴/۷۸	۳۵	۵	۲
۱۰۲۱/۲۵	۴۰	۱۰	۳
۱۳۴۵/۲۹	۴۰	۱۰	۴
۱۱۳۰/۹۶	۴۰	۱۰	۵
اشباع انتگرال گیر	۴۰	۲۰	۱۷
۱۱۸۹/۴۷	۴۰	۱۰	۶
۱۱۹۵/۲۲	۴۰	۱۰	۷
۱۱۹۱/۲۳	۴۰	۱۰	۸
۱۱۷۴/۸۸	۴۰	۵	۹
۱۱۸۴/۶۱	۴۰	۵	۱۰
۱۱۷۲/۵۹	۴۰	۵	۱۱
۱۱۶۵/۷۸	۴۰	۲۰	۱۲
۱۱۶۹/۹۸	۴۰	۲۰	۱۳
۱۱۵۹/۹۹	۳۰	۲۰	۱۴
۱۱۵۹/۹۹	۳۰	۲۰	۱۵
۱۱۸۹/۰۱	۵۰	۱۰	۱۶

با توجه به روابط آماری، انحراف معیار با رابطه (۴-۱۵) تعریف می‌شود و داده‌هایی که در محدوده  $\bar{K} \pm \sigma$  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 بدست می‌آید.



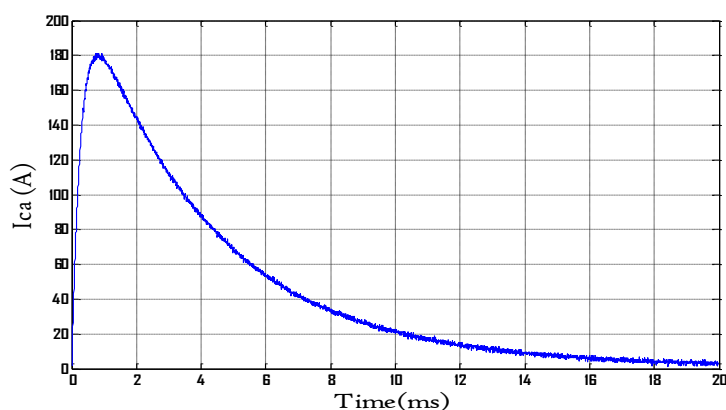
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (K_i - \bar{K})^2} \quad (15-4)$$

نکته بسیار مهم این است که فقط یک تست از مجموعه تست‌ها حذف گردید و این امر نشان‌گر معتبر بودن داده‌ها و نتایج بدست آمده است. خطای اندازه‌گیری ضریب کالیبراسیون ۰/۷۴٪ می‌باشد که از رابطه (۱۶-۴) محاسبه شد.

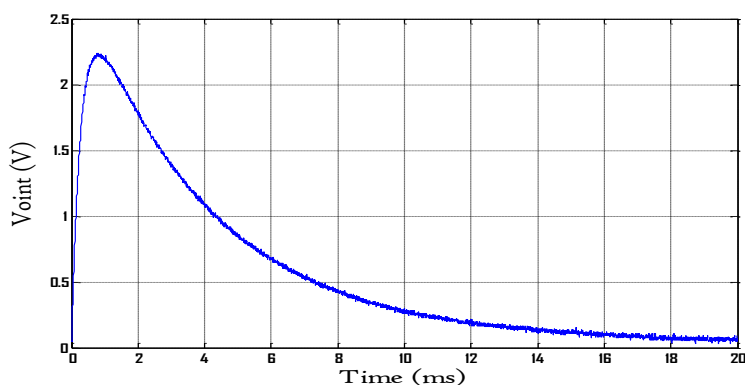
$$e = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{N}} \rightarrow \text{درصد خطا} = \frac{e}{k} \times 100 \quad (16-4)$$

نمودارهای مربوط به داده‌های تست شماره ۱ و ۱۰ به صورت نمونه در زیر آورده شده است.

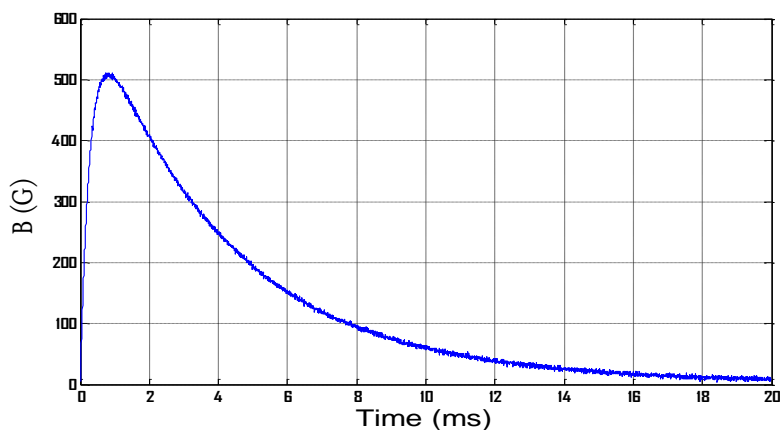
نمودارهای مربوط به تست ۱:



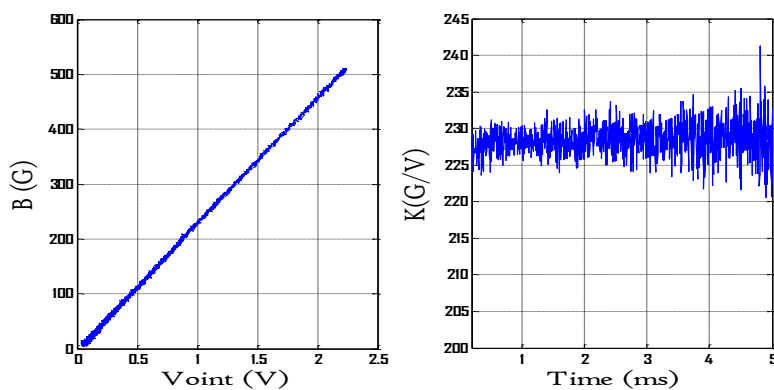
شکل ۴-۲۶: نمودار جریان گذرنده از سیملوله



شکل ۴-۲۷: نمودار ولتاژ خروجی حسگرهای مغناطیسی



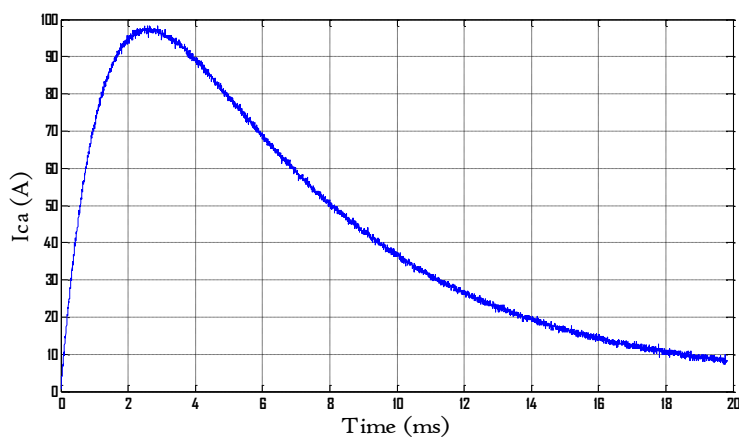
شکل ۴-۲۸: نمودار میدان ایجاد شده در مرکز سیملوله



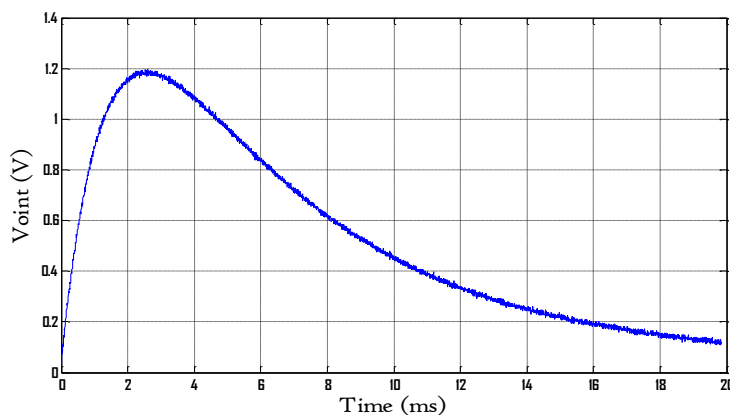
شکل ۴-۲۹: (a) نمودار میدان برحسب ولتاژ خروجی سیملوله

(b) نمودار مقادیر ضریب کالیبراسیون برای بازه زمانی ذکر شده

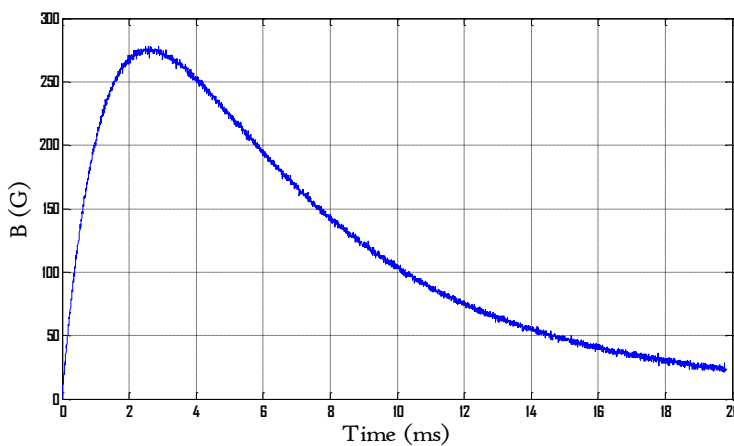
نمودارهای مربوط به تست ۱۰:



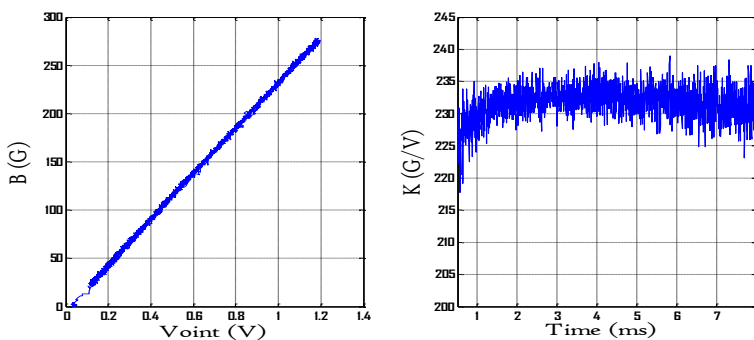
شکل ۴-۳۰: نمودار جریان گذرنده از سیملوله



شکل ۴-۳۱: نمودار ولتاژ خروجی حسگرهای مغناطیسی



شکل ۴-۳۲: نمودار میدان ایجاد شده در مرکز سیملوله

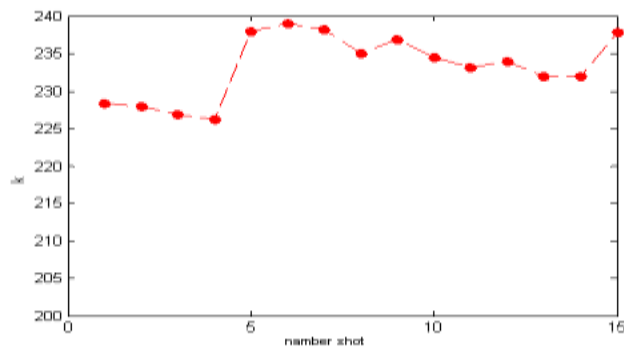


شکل ۴-۳۳: (a) نمودار میدان برحسب ولتاژ خروجی سیملوله

(b) نمودار مقادیر ضریب کالیبراسیون برای بازه زمانی ذکر شده

شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۳۰ نمودارهای جریان گذرنده از سیملوله در کل بازه زمانی اجرای آزمایش بوده و شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۳۱ نشانگر ولتاژ خروجی حسگر مغناطیسی مورد آزمایش است و شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۳۲ نمودارهای میدان ایجاد شده در مرکز سیملوله توسط محاسبات

انجام شده را در دو تست نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-۲۹ و شکل ۴-۳۳ مشخص شده است به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری، از داده‌های بازه زمانی که جریان قابل توجهی داشته است، استفاده شد. قابل ذکر است که جریان پلازما نیز مقدار قابل توجهی دارد بنابراین با این کار شرایطی مشابه حالت واقعی عملکرد حسگر ایجاد گردیده است. نمودار ضریب کالیبراسیون مربوط به کلیه داده‌ها نیز در شکل ۴-۳۴ آورده شده است.



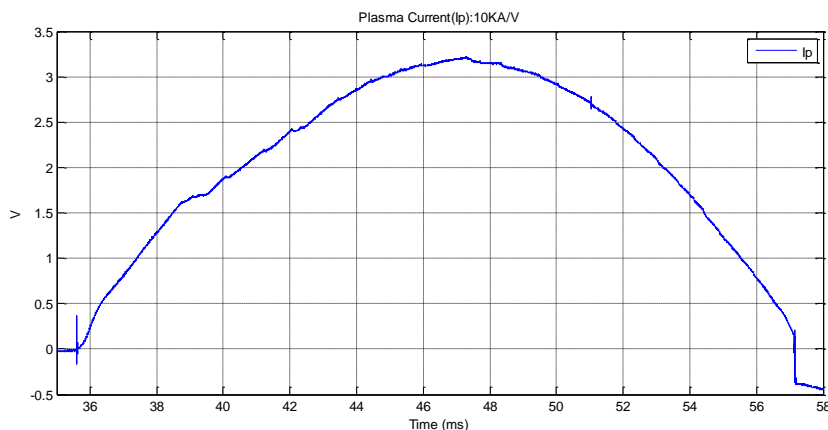
شکل ۴-۳۴: نمودار ضریب کالیبراسیون ( $\frac{K}{G}$ ) بعد از در نظر گرفتن مسائل آماری

برای گین‌های مختلف تقویت کننده به صورت جداگانه ضریب کالیبراسیون مربوطه  $\frac{K}{G}$  بدست آمد و نتایج به صورت جدول ۴-۵ می‌باشد. قابل ذکر است واحد مقدار ضریب کالیبره، گوس بر ولت است.

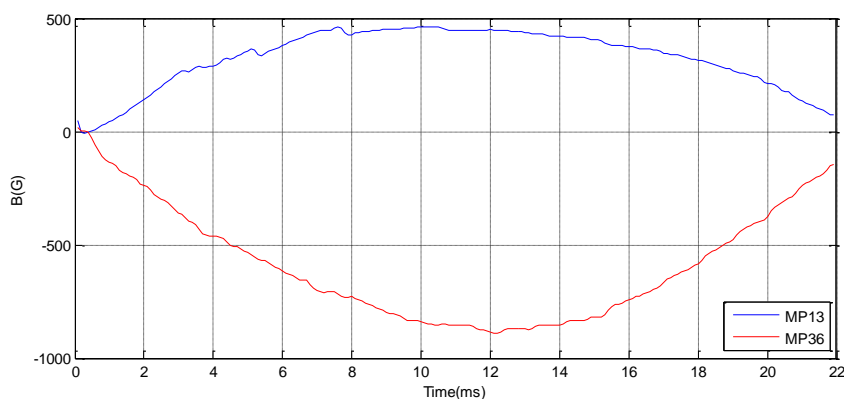
جدول ۴-۵: مقدارهای ضریب کالیبراسیون با گین‌های مختلف تقویت کننده

گین تقویت کننده	ضریب کالیبراسیون ( $\frac{K}{G}$ )
۵	۲۳۲/۵۲ (gos/volt)
۱۰	۱۱۷/۱۷ (gos/volt)
۲۰	۵۸/۱۹ (gos/volt)

در ادامه نمودارهای مربوط به جریان پلازما و میدان پلوئیدالی یک شات در توکامک دماوند به صورت نمونه آورده شده است. شکل ۴-۳۵ نمودار جریان پلازما و شکل ۴-۳۶ میدان پلوئیدالی در مکان قرارگیری حسگرهای مغناطیسی شماره ۱۳ و ۳۶ که در شکل ۴-۲۴ نمایان بود را نشان می‌دهد که با استفاده از ضریب کالیبراسیون نتیجه شده در بالا (برای گین ۵) به دست آمده است.



شکل ۴-۳۵: نمودار جریان پلازما



شکل ۴-۳۶: نمودار میدان پلوتیدالی در مکان قرارگیری حسگرهای ۱۳ و ۳۶

نتیجه‌گیری:

از آنجائیکه تاکنون سیستم حلقه بسته کنترل، برای کنترل  $\Psi_z$ ، که حاصلضرب جریان پلازما در مکان پلازما است، عمل می‌کرد و در واقع به این ترتیب کنترل موقعیت پلازما انجام می‌شد، برای بهبود عملکرد سیستم کنترل جابجایی عمودی پلازما مدار مربوط به تولید سیگنال مکان عمودی پلازما ( $Z_P$ )، طراحی و ساخته شده و به طور مستقیم مکان عمودی پلازما کنترل گردید. در ادامه با توجه به اینکه در این پروژه هدف شناسایی جابجایی عمودی پلازما با استفاده از حسگرهای مغناطیسی است. در این فصل ابتدا روابط فیزیکی نحوه اندازه‌گیری جابجایی پلازما با استفاده از حسگرهای مغناطیسی تشریح شد و در ادامه با توجه به اهمیت محل قرارگیری حسگرها، صحت نقشه محل قرارگیری آن‌ها که توسط روس‌ها ارائه شده بود، بررسی شده و این نتیجه بدست آمد که نقشه ارائه شده صحیح نبوده

است، بنابراین با وجود مشکلات موجود، خلأ محفظه شکسته شد و با اندازه‌گیری‌های دقیق محل درست حسگرها تعیین گردید. همچنین بدلیل عدم وجود ضریب کالیبراسیون حسگرهای مغناطیسی، با طراحی و انجام آزمایشی ضریب کالیبراسیون این حسگرها محاسبه شد که برای تحلیل، مورد نیاز بود و نیز می‌تواند در تحقیقاتی که در آینده ممکن است بر روی این حسگرها انجام شود مورد استفاده قرار گیرد.

## فصل پنجم:

# شناسایی و مدل‌سازی موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند

## ۵ + مقدمه:

تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل مطلوب، نیازمند داشتن مدل ریاضی دقیق از سیستم است و از آنجایی که کنترل پلاسما مبحث مهمی در گداخت هسته‌ای می‌باشد، مسئله یافتن مدل مکان پلاسما مطرح می‌شود. نکته قابل توجه این است که مدل بدست آمده باید دینامیک سیستم را تا آن‌جا که ممکن است بتواند توصیف کند.

اصولاً برای بدست آوردن یک مدل ریاضی از دستگاه دو روش وجود دارد:

❖ روش اول آن است که رفتار دینامیکی فرایند را با قوانین فیزیکی، توصیف کرده و مدلی

برای سیستم بدست آورده شود که این روش مدل‌سازی فیزیکی نام دارد.

❖ روش دوم آن است که با داشتن تعدادی ورودی و خروجی و اختصاص ساختار مناسب

برای مدل فرایند، پارامترهای مجهول مدل بدست می‌آید، که این روش شناسایی سیستم

نام دارد.

اما مشکل اینجاست که در بسیاری از موارد مانند جابجایی و شکل پلاسما، از طرفی فرایند آنقدر پیچیده است که نمی‌توان بر اساس قوانین فیزیکی مدل مناسب را بدست آورد و از طرفی هم همیشه امکان شناسایی وجود ندارد. بنابراین در این گونه موارد باید بعضی از پارامترهای دستگاه را با استفاده از قوانین فیزیکی و برخی را با تکنیک شناسایی محاسبه کرد [۲۹].

اگر مقایسه ای بین مدل سازی فیزیکی و شناسایی سیستم، داشته باشیم می‌توانیم بیان کنیم

که:

۱- در روش مدل‌سازی فیزیکی ضروری است اطلاعات کافی از رفتار و دینامیک اجزای درونی

سیستم داشته باشیم در صورتی که در شناسایی سیستم نیازی به داشتن اطلاعات فیزیک

درون سیستم نیست و صرفاً با داده‌های ورودی-خروجی مدل‌سازی انجام می‌شود اگرچه



هرچه اطلاعات کلی در مورد فیزیک سیستم بیشتر باشد مدل بهتری را با شناسایی سیستم می‌توان بدست آورد.

۲- در روش مدل‌سازی فیزیکی نمی‌توان همه پارامترهای مدل دینامیکی دستگاه را با روابط فیزیکی بدست آورد، بنابراین ممکن است برخی از دینامیک‌ها حذف شوند. اما در روش شناسایی اگر ساختار مدل به اندازه کافی غنی باشد، هیچ دینامیک موثری از سیستم حذف نخواهد شد.

۳- مدل‌های دینامیکی حاصل شده از روابط فیزیکی، غیر خطی و پیچیده بوده، که در طراحی سیستم‌های کنترل نیاز به داشتن چنین مدل‌های پیچیده‌ای نیست و کار بدین‌گونه پیچیده‌تر می‌شود. در حالی که در شناسایی سیستم کارمان را با مدل‌های ساده‌تر شروع می‌کنیم که استفاده از آن‌ها در طراحی راحت‌تر باشد [۳۰].

مدل ریاضی مکان عمودی پلازما در حالت استاتیکی به پارامترهای زیادی از جمله ساختار هندسی محفظه، مکان واندوکتانس پیچ‌های کنترلی و تزویج سیم‌پیچ‌های مختلف با یکدیگر و سرعت سوئیچ جریان و..... وابسته است. از طرفی در حالت دینامیکی نیز به پارامترهایی از قبیل جریان پلازما، رسانش جریان پلازما، فشار پلازما و..... بستگی دارد. بنابراین به دلیل پیچیدگی سیستم، مدل‌سازی فیزیکی مکان پلازما دارای مشکلات و سختی‌های زیادی است. از طرفی به دلیل عدم وجود کدهای محاسباتی لازم برای پروفایل‌های جریان پلازما و سطوح شار مغناطیسی در محفظه توکامک، مدل‌سازی کامل و صحیح فیزیکی بسیار دشوار است.

جابجایی عمودی پلازما، غیرخطی و متغیر با زمان است و معادلات مربوط به آن از طریق داده‌های حسگرهای مغناطیسی، هنوز به طور کامل بدست نیامده است. بنابراین می‌خواهیم با استفاده از داده‌های تجربی حسگرهای مغناطیسی و با بکارگیری تکنیک شناسایی، مدلی برای جابجایی عمودی پلازما بر اساس حسگرهای مغناطیسی بدست آوریم.

در سال ۲۰۰۵، شناسایی و تشخیص شکل و مکان پلازما در توکامک ایترا با پردازش سریع و طبقه‌بندی خروجی حسگرهای مغناطیسی، با استفاده از شبکه‌های عصبی انجام شد [۳۱]. همچنین شناسایی و پیش‌بینی مکان و شکل پلازما در توکامک‌های آزدکس آپگریت، کی استار<sup>۱</sup>، جی تی شصت<sup>۲</sup> و ایترا بررسی و مطالعه شده است [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵].

در توکامک دماوند سیستم حلقه بسته برای کنترل  $\Psi_Z$  (حاصلضرب جریان در مکان عمودی پلازما) انجام می‌گردد و مدل‌های دینامیکی حرکت پلازما برای جابجایی عمودی و افقی پلازما با استفاده از حسگرهای حلقه زینی بدست آمده است [۱۹] و [۲۰]. ولی از آنجایی که هدف کنترل مکان واقعی پلازما است همانطور که در فصل قبل بیان گردید، مدار الکتریکی مربوط به تهیه مکان عمودی پلازما ( $Z_p$ ) با استفاده از سیگنال  $\Psi_Z$ ، طراحی و ساخته شد و در ادامه سیستم حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلازما بر اساس، سیگنال مکان عمودی واقعی پلازما ( $Z_p$ ) بسته شد. که این موجب بهبود عملکرد سیستم کنترل برای جابجایی عمودی پلازما گردید.

در این فصل مدل دینامیکی مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند بر اساس داده‌های حسگرهای مغناطیسی شناسایی خواهد شد. بنابراین در نهایت یک مدل پیش‌بین و یک مدل شبیه‌ساز به عنوان سیمولاتور طراحی می‌گردد که بر اساس آن‌ها در آینده می‌توان کنترل‌کننده هوشمند طراحی و اجرا کرد. بر این اساس این فصل شامل سرفصل‌های زیر خواهد بود. در بخش ۲-۵، روش‌های مختلف شناسایی یک فرآیند به طور کلی بیان می‌شود و در بخش ۳-۵، مراحل شناسایی موقعیت عمودی پلازما بر اساس داده‌های حسگرهای مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش ۴-۵، طراحی مدل پیش‌بین جابجایی عمودی پلازما به طور مفصل بیان می‌گردد و در ادامه در بخش ۵-۵، مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلازما طراحی و ارزیابی

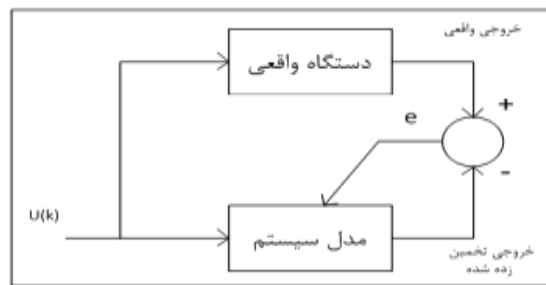
می‌شود و نتایج آن با کارهای قبلی در این خصوص مقایسه می‌گردد. در نهایت امر، نتیجه فصل را خواهیم داشت.

## ۴ ۵ روش‌های مختلف شناسایی یک فرایند

اصولاً دو روش عمده برای شناسایی وجود دارد:

### الف: شناسایی روی خط<sup>۱</sup>

در این روش مدل همزمان با کارکرد دستگاه آموزش داده می‌شود به طوری که در هر پریود از نمونه برداری سیستم، مدل شناسایی شده به روز می‌گردد. بنابراین مدل با عملکرد سیستم در دینامیک‌های مختلف آموزش می‌بیند. بلوک دیاگرام نحوه عملکرد این شیوه در شکل ۵-۱ آورده شده است. این روش برای سیستم‌هایی که عملکرد کندی دارند (فرصت کافی برای پردازش داده‌ها و همچنین آموزش مدل وجود دارد) مورد استفاده قرار می‌گیرد که در توکامک دماوند به علت عملکرد سریع قابل استفاده نمی‌باشد.



شکل ۵-۱: بلوک دیاگرام مربوط به نحوه شناسایی روی خط [۲۰]

### ب: شناسایی خارج خط<sup>۲</sup>

در این روش سیستم نمی‌تواند در حین کار شناسایی شود و یا نیازی به شناسایی روی خط سیستم وجود ندارد. بنابراین مدل سیستم با بررسی داده‌های عملی دستگاه بدست می‌آید.

1-Online  
2-Offline

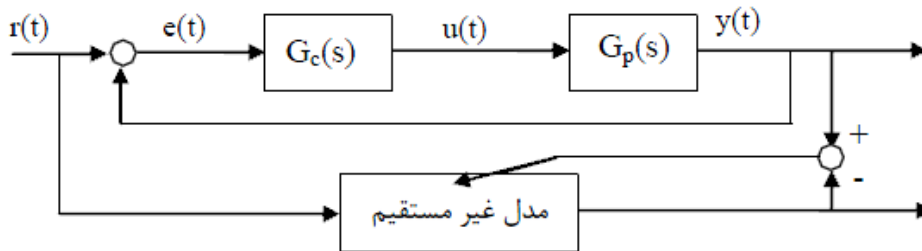
در هر روش برای بدست آوردن مدل مناسب ضروری است سیگنال اعمال شده به عنوان ورودی تا حد زیادی توانایی تحریک تمام مدهای سیستم را داشته باشد.

#### ۵ ۴ - دیدگاه‌های مختلف در مورد شناسایی حلقه بسته

برای شناسایی سیستم‌های حلقه بسته، می‌توان از شناسایی حلقه بسته استفاده نمود که به طور کلی به دو شیوه زیر انجام پذیر است:

##### الف: روش غیرمستقیم

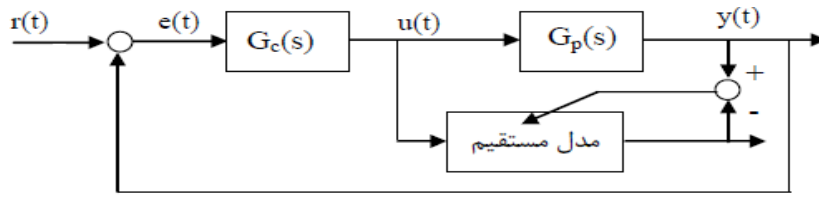
در این روش برای شناسایی سیستمی که جهت اعمال کنترل در حلقه بسته قرار داده شده است از ورودی و خروجی سیستم حلقه بسته استفاده کرده و سیستم حلقه بسته را شناسایی می‌کنند و در ادامه با داشتن دینامیک کنترل کننده و روابط حاکم بر فیدبک مدل سیستم مورد نظر بدست می‌آید. در شکل ۲-۵ بلوک دیاگرام مربوط به شناسایی غیر مستقیم آورده شده است.



شکل ۲-۵: بلوک دیاگرام مربوط به شناسایی غیرمستقیم

##### ب: روش مستقیم:

در این روش هم مطابق شکل ۳-۵ سیستم در حلقه بسته قرار دارد ولی داده‌های مورد نیاز برای شناسایی از داده‌های ورودی و خروجی خود فرایند تهیه می‌شود.



شکل ۵-۳: بلوک دیاگرام مربوط به شناسایی به روش مستقیم

اگر در حالت کلی عدم قطعیت در کنترل‌کننده وجود داشته باشد، با استفاده از روش شناسایی غیر مستقیم ممکن است که نتوانیم مدل مناسبی از فرایند بدست آوریم، چون این روش هنگامی کاربرد دارد که دینامیک کنترل‌کننده کاملاً مشخص باشد.

در مقابل در حالتی که نویز جمع‌شونده در خروجی داشته باشیم با توجه به فیدبک گرفته شده از خروجی سیستم داده‌های ورودی مدل ( $u(t)$ ) نویز آلود بوده و برای شناسایی مناسب نمی‌باشند که در این حالت استفاده از بلوک ارائه شده در شکل ۵-۳ پیشنهاد نمی‌شود.

#### ۵ ۴ ۴ - مراحل شناسایی یک فرایند

به طور کلی مراحل شناسایی یک فرایند عبارتند از:

۱- طراحی و انجام آزمایش

۲- پردازش اولیه داده‌ها

۳- انتخاب ساختار مدل

۴- تخمین پارامترها

۵- تعیین اعتبار مدل

در ادامه هر کدام از مراحل فوق، برای شناسایی موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند به تفصیل بیان خواهد شد.

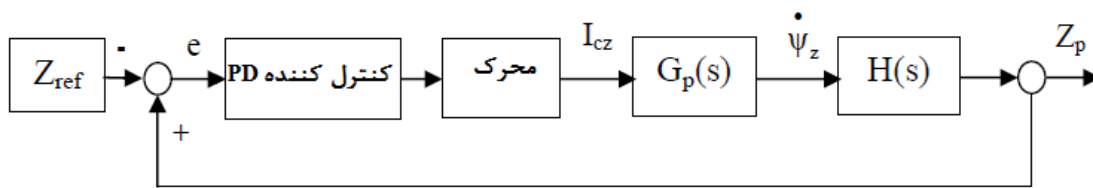
## ۴ ۵ مراحل شناسایی موقعیت عمودی پلازما بر اساس داده‌های حسگرهای مغناطیسی

در توکامک دماوند کل پدیده محصورسازی در مدت زمان ۲۰ms انجام می‌شود. بنابراین به دلیل عملکرد سریع سیستم، آموزش و شناسایی مدل به طور روی خط امکان‌پذیر نمی‌باشد و سیستم به صورت خارج خط و مستقیم شناسایی می‌شود.

### ۴ ۵ - طراحی و انجام آزمایش

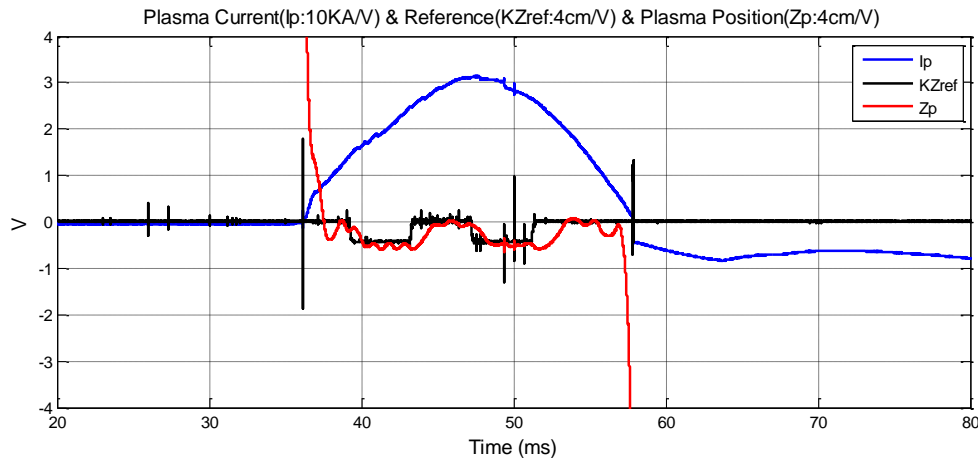
اولین گام برای شناسایی یک فرایند طراحی و انجام آزمایش است. در این پروژه برای تهیه یک مدل مناسب برای حرکت عمودی پلازما آزمایش‌های مختلفی به صورت حلقه باز و حلقه بسته انجام شد. در طی انجام این آزمایش‌ها لازم است فشار و گاز ورودی محافظه در هر دو حالت و در همه شات‌ها یکسان باشد همچنین ظرفیت بانک‌های خازنی مختلف برای تولید میدان‌های مغناطیسی بایستی یکسان باشد. به عبارت دیگر لازم است کلیه این آزمایش‌ها در نقطه کار یکسان صورت پذیرد. [۱۹]

در حالت کلی بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند در شکل ۴-۵ آورده شده است.



شکل ۴-۵: بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند [۱۹]

سیستم حلقه بسته کنترل مکان عمودی با توجه به بلوک دیاگرام شکل ۴-۵ در توکامک دماوند مورد آزمایش قرار گرفت و یک نمونه از داده‌های تجربی سیستم در شکل ۵-۵ زیر آورده شده است.



شکل ۵-۵: داده‌های مربوط به شات ۲۷ در حالت حلقه بسته

در نمودار بالا، سیگنال  $I_p$  جریان پلاسما،  $KZ_{ref}$  سیگنال مرجع ورودی و  $Z_p$  مکان عمودی پلاسما می‌باشد که همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، حاصل تقسیم شار میدان مغناطیسی بر جریان پلاسما  $\frac{\Psi_Z}{I_p}$  است.

از آنجایی که سیگنال ورودی که در شناسایی به کار می‌رود نقش بسیار مهمی در نتایج حاصل از شناسایی ایفا می‌کند انتخاب سیگنال ورودی در طراحی و انجام آزمایش در حالت حلقه بسته، موضوع مهمی است. برای شناسایی صحیح یک فرایند سیگنال ورودی باید به گونه‌ای باشد که کلیه مدهای سیستم را تحریک نماید و همچنین باید به گونه‌ای باشد که از نظر عملی قابل اعمال به سیستم باشد یعنی از نظر دامنه و فرکانس در محدوده پهنای باند سیستم باشد. به همین منظور معمولاً سیگنال PRBS به عنوان سیگنال ورودی انتخاب می‌شود.

انتخاب دامنه سیگنال ورودی باید از جنس سیگنال اندازه‌گیری باشد که در این سیستم باید در محدوده جابجایی عمودی پلاسما ( $\pm 12\text{cm}$  یا  $\pm 6\text{V}$ ) قرار گیرد. قابل ذکر است، در صورتی که دامنه سیگنال ورودی کمتر از  $0.1$  ولت باشد (معادل  $2\text{mm}$  جابجایی)، اثر نویز بیشتر از ورودی شده و خروجی صحیح نخواهد بود.

از طرف دیگر انتخاب فرکانس سیگنال ورودی نیز مهم می‌باشد که در این سیستم به دلیل محدودیت فرکانس در جریان کنترلی ( $I_{CZ}$ ) و نیز وابستگی تغییرات آن به سیگنال ورودی ( $Z_{ref}$ )

باید سیگنال ورودی بر اساس حداکثر سرعت تغییر جهت و اندازه جریان سیم‌پیچ کنترلی انتخاب گردد.

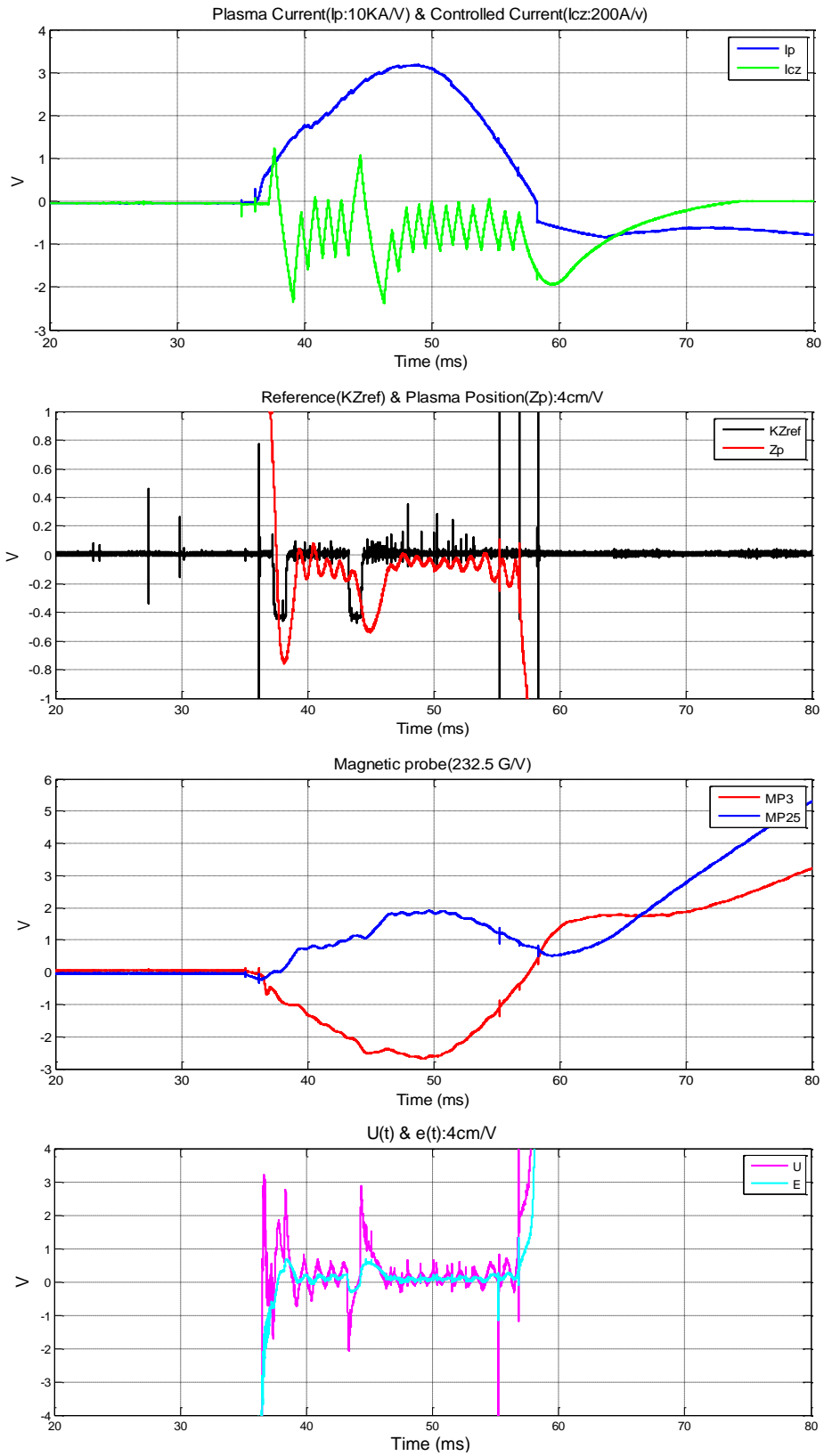
سه عامل مهمی که در ایجاد محدودیت فرکانسی نقش اساسی دارند مطابق زیر است:

- ❖ عدم امکان تغییر ناگهانی در جهت و اندازه جریان سیم‌پیچ‌های کنترلی
- ❖ تاخیر در جابجایی پلاسما و همچنین وجود تاخیر در سنسور اندازه‌گیر آن.
- ❖ محدودیت دامنه و فرکانس جریان در مدار پل به هنگام تبدیل ولتاژ DC خازن  $C_z$  به جریان AC.

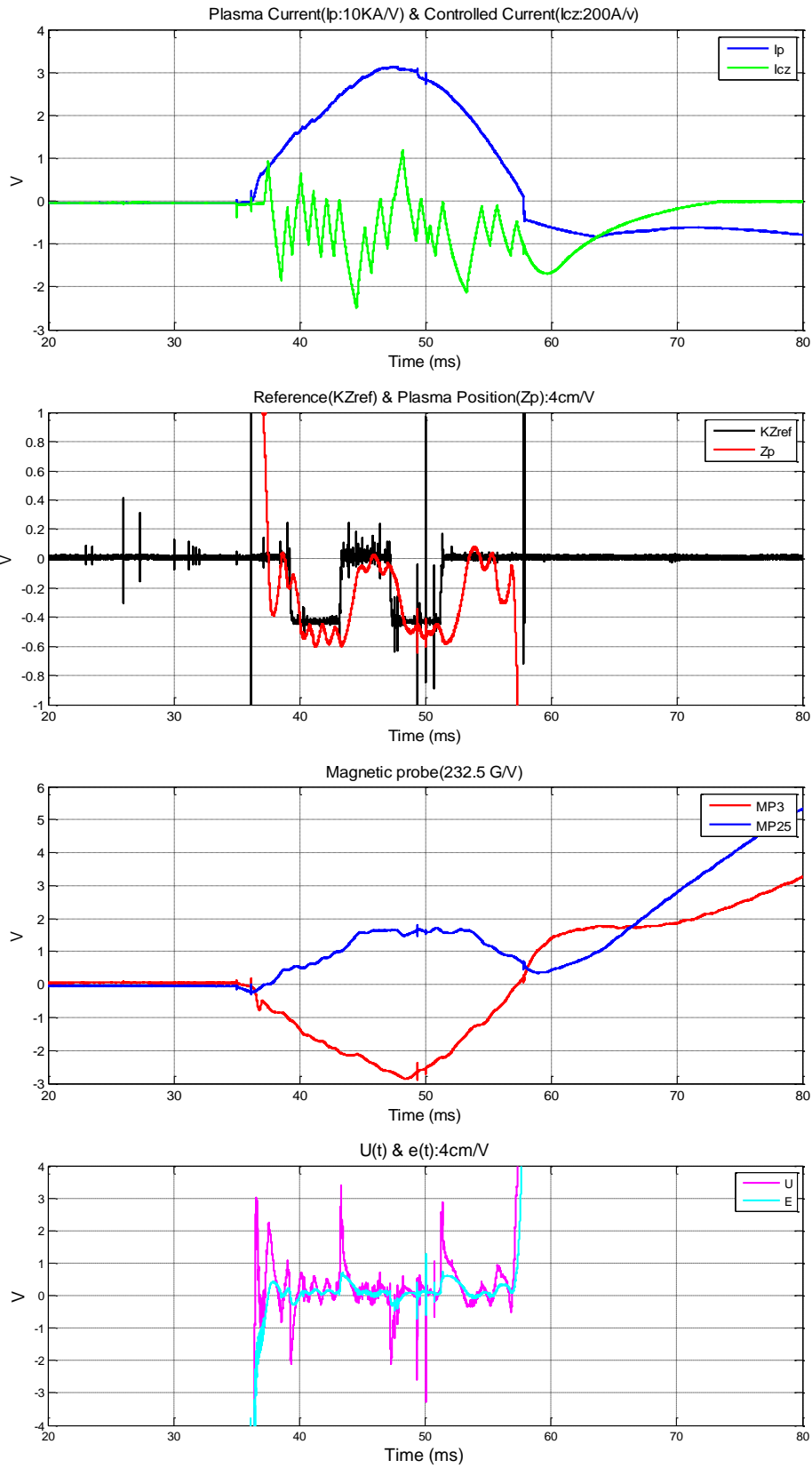
در توکامک دماوند با توجه به قطعات مدار تبدیل ولتاژ DC خازن به جریان AC و در نظر گرفتن محدودیتهای ذکر شده اعمال ورودی با فرکانس در حد ۱ kHz مناسب است.

زمان محصورسازی پلاسما در توکامک دماوند حدود ۲۰ms است، با توجه به محدودیت فرکانسی که در اعمال سیگنال ورودی به این سیستم وجود دارد این زمان برای تولید یک سیگنال PRBS غنی کافی نمی‌باشد لذا در طول هر شات بخشی از این سیگنال به عنوان سیگنال مرجع اعمال گردیده است، بنابراین با توجه به محدودیت فوق تا حد امکان در شات‌های مختلف پالس‌هایی با دامنه و فرکانس مختلف به سیستم اعمال شد تا با داده‌های چندین شات متفاوت بتوانیم شناسایی خوبی داشته باشیم و مدل مناسبی برای سیستم بدست آوریم. در نهایت تعداد ۱۰۰ شات برای تهیه پایگاه داده‌ها جمع‌آوری و ذخیره گردیده است. در شکل ۵-۶، شکل ۵-۷ و شکل ۵-۸ چند نمونه از داده‌های عملی سیستم در حالت حلقه بسته به همراه سیگنال PRBS ورودی آورده شده است.

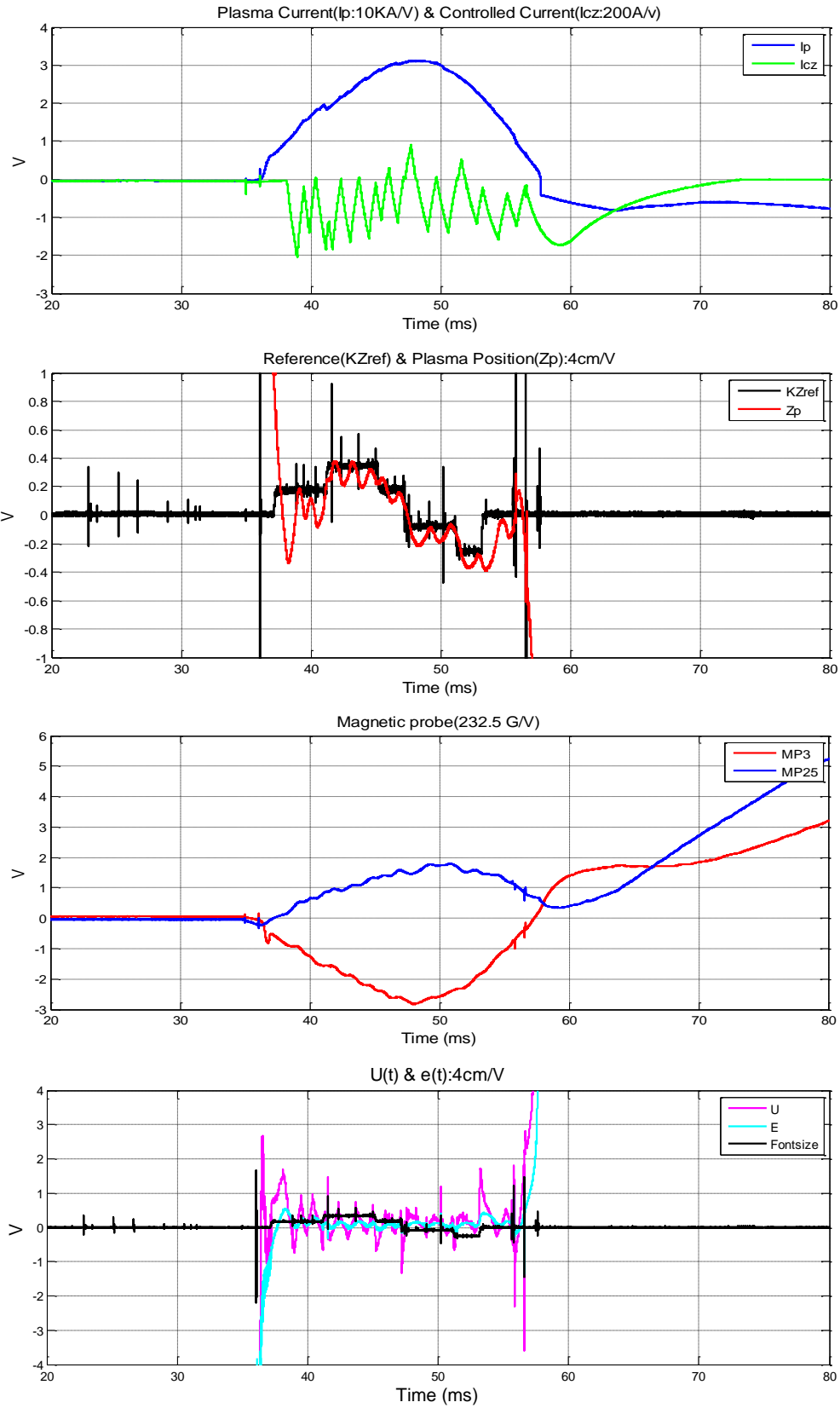




شکل ۵-۶: داده‌های مربوط به شات ۲۷ در حالت حلقه بسته



شکل ۵-۷: داده‌های مربوط به شات ۲۰ در حالت حلقه بسته



شکل ۵-۸: داده‌های مربوط به شات ۱۳ در حالت حلقه بسته

## ۵ ۴ ۴ - پردازش اولیه داده‌ها

جهت تهیه مدل سیگنال‌هایی از قبیل جریان پلاسما، جریان پیچ‌های کنترلی، سیگنال مکان عمودی پلاسما و خروجی‌های حسگرهای مغناطیسی ذخیره شدند. ولی در ادامه به دلیل وجود میدان‌های قوی، تابش اشعه ایکس و موج فرکانس بالا<sup>۱</sup>، محیط سیستم توکامک را به شدت نویزی می‌کنند که این نویز از طریق کابل‌ها از محل اندازه‌گیری وارد سیستم داده‌گیری می‌گردد. بنابراین به دلیل وجود نویزهای فرکانس بالا و همچنین وجود خطای بایاس در بعضی از داده‌های ورودی- خروجی لازم است که بعد از تهیه داده‌ها، پیش‌پردازشی روی آن‌ها صورت گیرد و از داده‌های واقعی جهت شناسایی استفاده شود.

یکی از مسائل مهم در مورد داده‌های استفاده شونده در شناسایی این است که تغییرات ایجاد شده در خروجی، به دلیل ورودی سیستم باشد. به عبارت دیگر تغییرات در اثر عوامل و اغتشاشات دیگر بوجود نیامده باشد. بنابراین پس از بررسی داده‌های ورودی و خروجی و نمایش FFT آن‌ها این نتیجه حاصل شد که با اعمال فیلتر پایین‌گذر با پهنای باند ۳KH بدون تغییر فاز و بدون حذف اطلاعات معتبر می‌توان نویز محیط را حذف نمود. از طرفی برخی از خروجی اندازه‌گیرهای سیگنال‌ها، دارای خطای بایاس می‌باشند که برای استفاده از این داده‌ها بایاس ایجاد شده حذف گردید.

یکی دیگر از نکات مهم در شناسایی انتخاب فرکانس نمونه‌برداری از سیستم می‌باشد. از آنجایی که نمونه‌برداری از سیگنال‌های پیوسته موجب نابودی بعضی از اطلاعات می‌شود ضروری است فرکانس نمونه برداری بگونه‌ای باشد که در شناسایی سیستم مشکلی ایجاد نکند. فرکانس نمونه برداری زیاد امکان ردیابی سریع سیگنال مرجع را فراهم خواهد کرد و سیگنال کنترل نرم‌تر خواهد بود و با این انتخاب اطلاعات کمتری را از دست می‌دهیم اما در صورتی که این فرکانس در

---

1-Radio Frequency(RF)

مقایسه با دینامیک سیستم خیلی بزرگ انتخاب گردد می‌تواند مشکلات عددی به بار آورد. بنابراین زمان نمونه برداری باید با توجه به مشخصات سیستم و حلقه کنترل‌کننده طراحی شود. از جمله مشکلاتی که نمونه‌برداری‌های سریع به دنبال دارند این است که در مدل‌های بدست آمده با زمان‌های نمونه‌برداری کوچک قطب‌های سیستم به نزدیکی نقطه بحرانی صفحه  $Z$  نزدیک می‌شوند و نمونه‌برداری با فرکانس بالا از سیستم می‌تواند منجر به یک سیستم غیرمینیمم فاز گردد در حالیکه سیستم اصلی مینیمم فاز بوده است.

روش‌هایی برای بدست آوردن زمان بهینه برای نمونه‌برداری وجود دارد، ولی در مسائل عملی این محاسبات بسیار پیچیده خواهند بود. عموماً برای شناسایی سیستم زمان نمونه برداری  $0.1$  ثابت زمانی مناسب است که در سیستم توکامک دماوند با بررسی‌های انجام شده ثابت زمانی حدود  $1\text{ ms}$  بدست آمد بنابراین زمان نمونه برداری مناسب حدود  $100\ \mu\text{s}$  انتخاب شد. به دلیل تنظیمات اولیه سیستم داده‌گیری، داده‌ها با فرکانس پنج مگاهرتز نمونه‌برداری شدند بنابراین داده‌های مورد استفاده در شناسایی را با کاهش نمونه<sup>۱</sup> در پردازش داده‌ها به زمان نمونه‌برداری مناسب یعنی  $100\ \mu\text{s}$  رساندیم.

موضوع مهم دیگر اینکه، حسگرهای مغناطیسی توکامک علاوه بر اینکه از جابجایی پلاسما متأثر هستند، جریان سیم‌پیچ مرکزی ( $I_i$ ) و تعادلی ( $I_r$ ) نیز بر آن‌ها اثر دارند، که در حالت ایده آل باید فقط اثر جابجایی عمودی پلاسما را اندازه‌گیری کنند. بنابراین باید اثرات جریان سیم‌پیچ مرکزی ( $I_i$ ) و تعادلی ( $I_r$ ) از آن‌ها به صورت مقادیر پیش زمینه حذف شوند. بر این اساس با انجام تستی در حالت وجود کلیه میدان‌ها و عدم وجود پلاسما مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مغناطیسی ذخیره گردید و از کلیه سیگنال‌ها حذف شدند.

در سیستم داده‌گیری زمان اندازه‌گیری هریک از سیگنال‌ها برابر  $100\text{ms}$  است. اما می‌دانیم زمان محصورسازی پلازما حدود  $21\text{ms}$  بوده و از طرفی برای کنترل مکان عمودی فرمان کنترلی با تأخیر داده می‌شود. بنابراین باید داده‌ها در محدوده زمانی وجود پلازما بعد از اعمال سیگنال کنترلی تا زمان اتمام آن برای شناسایی انتخاب شود. علاوه بر این برای بعضی از شات‌ها در طول زمان تولید پلازما، عمل گسیختگی پلازما رخ داده است که در آن صورت باید داده‌ها تا زمان گسیختگی ثبت شوند.

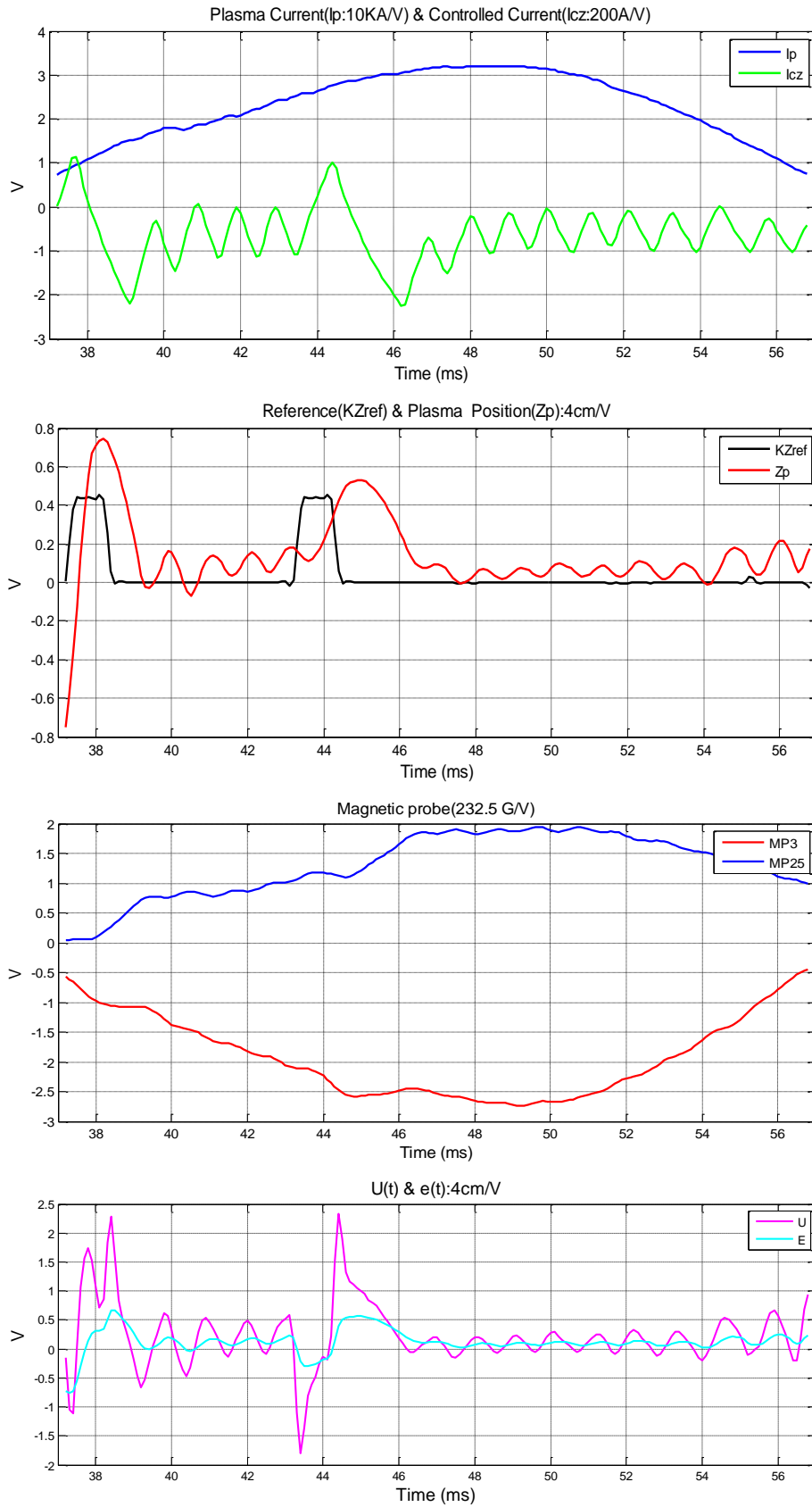
نمونه‌ای از اجرای برنامه تهیه شده برای پیش پردازش داده‌ها در شکل ۵-۹ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود فرکانس فیلتر، زمان شروع، اتمام و نرخ نمونه‌برداری در آن قابل تنظیم است و با اعمال آن‌ها پیش‌پردازش داده‌ها انجام شده و نتایج آن ذخیره می‌شود.



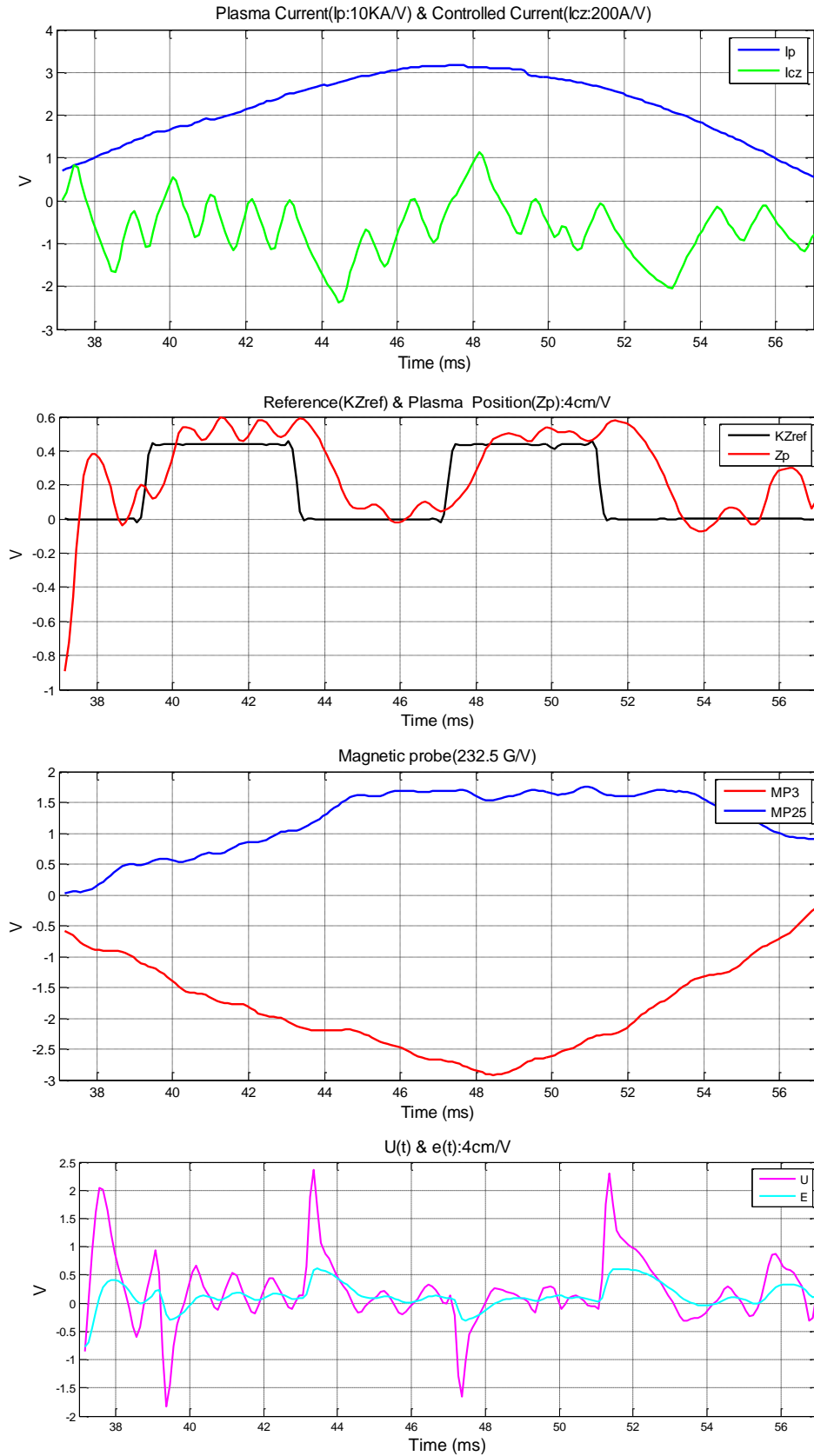
شکل ۵-۹: اجرای برنامه پیش‌پردازش برای فیلتر، حذف offset، انتخاب محدوده زمانی و کاهش نمونه‌برداری

در ادامه داده‌های پیش‌پردازش شده برای چند تست متفاوت به صورت نمونه در شکل ۵-۱۰،

شکل ۵-۱۱ و شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.

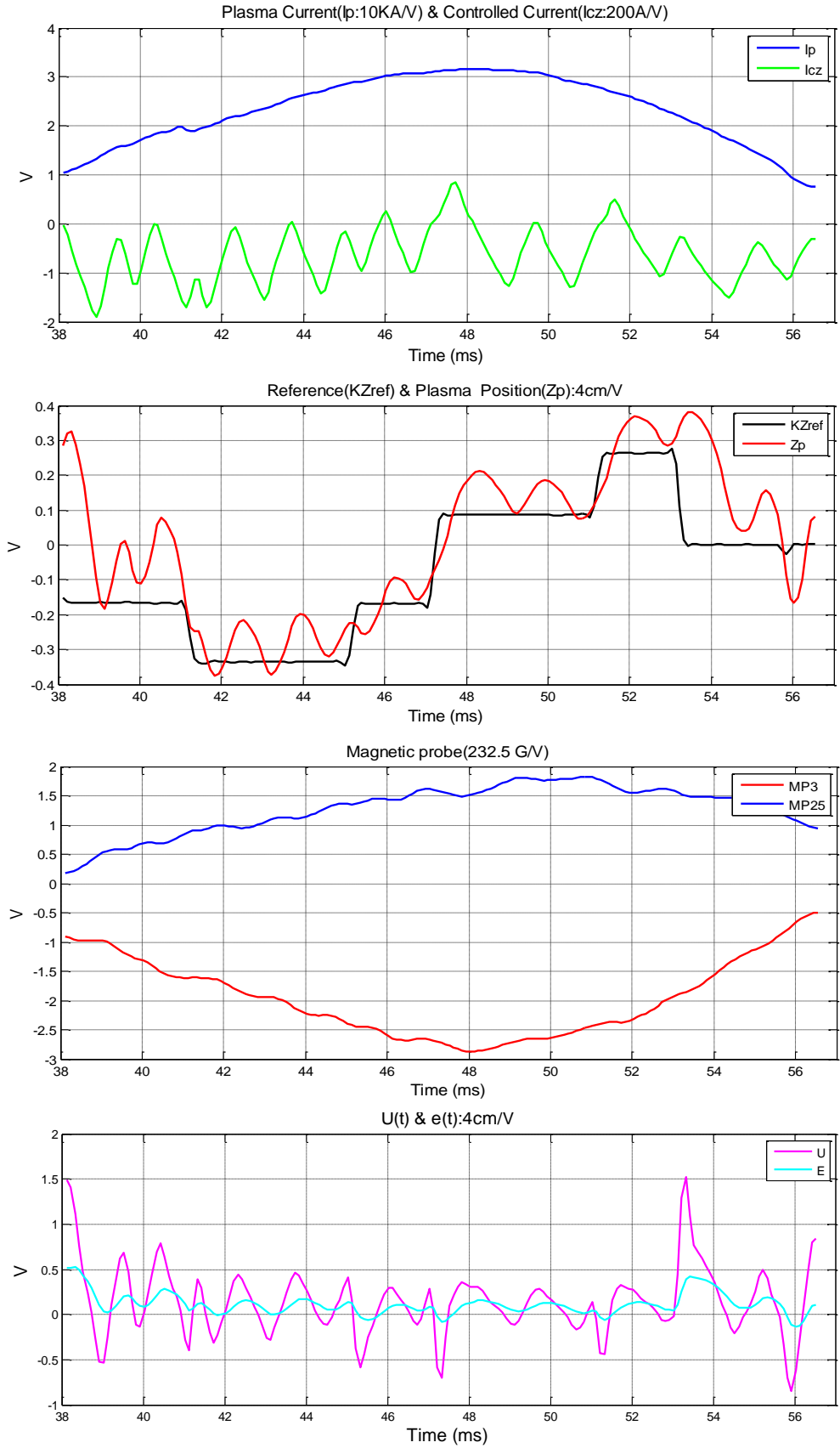


شکل ۵-۱۰: داده‌های پیش‌پردازش شده مربوط به شات ۲۷ در حالت حلقه بسته



شکل ۵-۱۱: داده‌های پیش‌پردازش شده مربوط به شات ۲۰ در حالت حلقه بسته





شکل ۵-۱۲: داده‌های پیش‌پردازش شده مربوط به شات ۱۳ در حالت حلقه بسته

پس از ثبت ورودی‌های مناسب، گام مهم بعدی انتخاب ساختار مناسب برای مدل است که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

### ۴ ۳ ۵ - انتخاب ساختار مدل

برای شناسایی سیستم‌های غیر خطی مدل‌های مختلفی استفاده می‌شود. از این دسته می‌توان به مدل‌های NFIR<sup>۱</sup>، NARMA<sup>۲</sup>، NARX<sup>۳</sup>، NARMAX<sup>۴</sup>، NOE<sup>۵</sup> اشاره نمود [۳۰]. در هر یک از این ساختارها بردار ورودی متفاوت از دیگری می‌باشد و برای سیستم با شرایط خاصی استفاده می‌شوند.

شبکه‌های عصبی ابزاری مناسب برای شناسایی توابع غیرخطی می‌باشند. بدلیل ویژگی‌های غیرخطی و پیچیده سیستم توکامک، شبکه عصبی یک راه حل مناسب برای شناسایی و تخمین مکان و شکل پلاسما در توکامک‌های پیشرفته است.

در سال‌های اخیر شبکه‌های عصبی<sup>۶</sup> با داشتن ساختار غیرخطی و قابلیت یادگیری، مسیر جدیدی را برای بدست آوردن کنترل بهینه حلقه بسته در مسائل غیرخطی مطرح کرده است [۳۶]. همچنین ابزار مناسبی برای تخمین پارامترهای مسائل غیرخطی و پیچیده محسوب می‌شود.

بنابراین بدلیل دارا بودن قابلیت یادگیری آماری و غیر فیزیکی، مشخصات و ویژگی‌های سیستم را، بطور سریع ارائه می‌نمایند. بر اساس این خصوصیات مفید، شبکه عصبی به عنوان ابزاری مهم برای شناسایی و تخمین مکان و شکل پلاسما در توکامک‌های پیشرفته مطرح می‌گردد. استفاده از شبکه عصبی برای شناسایی و پیش‌بینی پارامترهای پلاسما در توکامک دی تری-دی اولین بار توسط لیستر انجام شد [۳۷]. با استفاده از شبکه‌های عصبی دوگانه و اندازه‌گیری تجربی از

- 
- 1-Nonlinear Finite Impulse Response
  - 2-Nonlinear Autoregression Moving Average
  - 3-Nonlinear Autoregression Extra input
  - 4-Nonlinear Autoregression Moving Average Extra input
  - 5-Nonlinear Output Error
  - 6-Neural Network

حسگرهای مغناطیسی در توکامک کی استار نیز جابجایی افقی در آن به خوبی پیش‌بینی شده است [۳۸].

انتخاب یک مدل مناسب برای سیستم از دشوارترین مراحل شناسایی می‌باشد. یک ساختار مدل یک مجموعه از مدل‌های پیشنهادی می‌باشد که باید بین اعضای آن بهترین مدل جستجو شود. به طور کلی مسئله انتخاب ساختار مدل شامل دو قسمت می‌باشد. در ابتدا باید یک خانواده از انواع شبکه‌های عصبی (MLP, RBF, ...) را که برای توصیف سیستم مناسب می‌باشد را انتخاب نموده و سپس یک زیرمجموعه از خانواده ساختارهای مدل برگزیده شده را انتخاب کرد.

اگر شبکه مورد نظر MLP<sup>۱</sup> یا RBF<sup>۲</sup> انتخاب شود فقط با انتخاب مناسب یک ساختار داخلی برای شبکه عصبی و آموزش آن و ورودی‌های مناسب برای شبکه می‌توان بخوبی مدل سیستم را شناسایی نمود.

#### ۵ ۴ - تخمین پارامترها و تعیین اعتبار مدل

شبکه عصبی به واسطه تکرار فرآیند یادگیری قادر است با اعمال تنظیمات لازم بر روی وزن‌ها به الگوی مناسب دست یابد. برای آموزش پارامترهای یک شبکه روش‌های متفاوتی از جمله الگوریتم LM<sup>۳</sup>، گرادیان نزولی، الگوریتم CG<sup>۴</sup> به کار می‌روند. که در یک سیستم با در نظر گرفتن ویژگی‌های هر روش و شرایط حاکم به آن سیستم، شیوه‌ای برای آموزش انتخاب می‌شود.

مدلی که برای یک سیستم بدست می‌آید باید ارزیابی شده و مشخص گردد که مدل مناسبی است. بنابراین داده‌های موجود برای آموزش و تست تقسیم‌بندی می‌شود. داده‌های آموزش را برای آموزش پارامترهای شبکه استفاده نموده و با داده‌های تست مدل بدست‌آمده ارزیابی می‌شود.

---

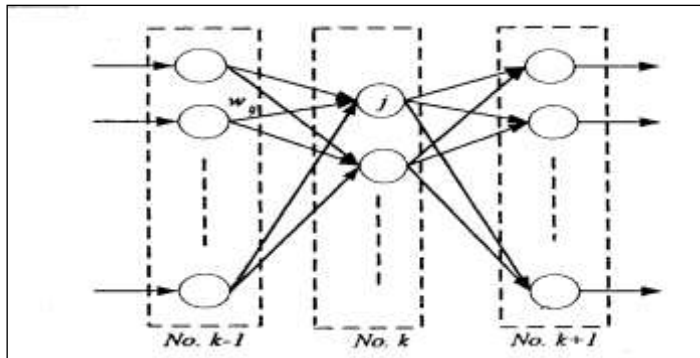
1-Multi Layer Perceptron  
2-Radial Base Function  
3-Levenberg Marquardt  
4-Conjugate Gradient

در این پروژه از تکنیک‌های شناسایی سیستم‌های غیرخطی دینامیکی، مدل NARX برای مدل پیش‌بینی استفاده شده است که در آن پارامترهای مدل، بر اساس ساختار شبکه‌های MLP است. تخمین پارامترهای مدل بر اساس یادگیری LM می‌باشد [۳۹].

### شبکه‌های عصبی MLP

به طور خلاصه فرمولاسیون مربوط به شبکه‌های عصبی با یادگیری BP<sup>۱</sup> در ذیل بیان خواهد شد. ساختار معمول برای این شبکه در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.

فرض کنید که یک شبکه با  $k+1$  لایه، تعداد نرون مفروض در هر لایه برابر  $n_0, n_1, \dots, n_k$  و  $\theta_k$  بردار بایاس در داخل بردار  $W_k$  باشد. لایه صفر لایه ورودی است. در لایه یکم بردار ورودی  $X$ ، بردار وزن  $W_1$ ، بردار حالت  $Y_1$  بردار خروجی  $O_1$  و ارتباطات بین آن‌ها می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۴۰].



شکل ۵-۱۳: ساختار یک شبکه با آموزش BP [۱۹].

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n_0} \end{bmatrix}, W_1 = (w_{ij}^1)_{n_0 \times n_k}, Y_1 = \begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ \vdots \\ y_{n_k}^1 \end{bmatrix} = W_1^T X, O_1 = \begin{bmatrix} o_1^1 \\ o_2^1 \\ \vdots \\ o_{n_k}^1 \end{bmatrix} = f(Y_1) \quad (1-5)$$

1-Back Propagation

به طور مشابه در لایه  $k$ ام، ماتریس وزن  $W_k$ ، بردار حالت  $Y_k$ ، بردار خروجی  $O_k$  و روابط بین آنها نیز می‌تواند به صورت زیر فرمول‌بندی شود:

$$W_k = (w_{ij}^k)_{n_{k-1} \times n_k}, \quad Y_k = \begin{bmatrix} y_1^k \\ y_2^k \\ \vdots \\ y_{n_k}^k \end{bmatrix} = W_k^T O_{k-1}, \quad O_k = \begin{bmatrix} o_1^k \\ o_2^k \\ \vdots \\ o_{n_k}^k \end{bmatrix} = f(Y_k) \quad (۲-۵)$$

که در آن  $o_i^k = f(y_i^k)$  و  $f$  تابع پایه برای شبکه است:

$$f(s) = \tanh(s) \quad (۳-۵)$$

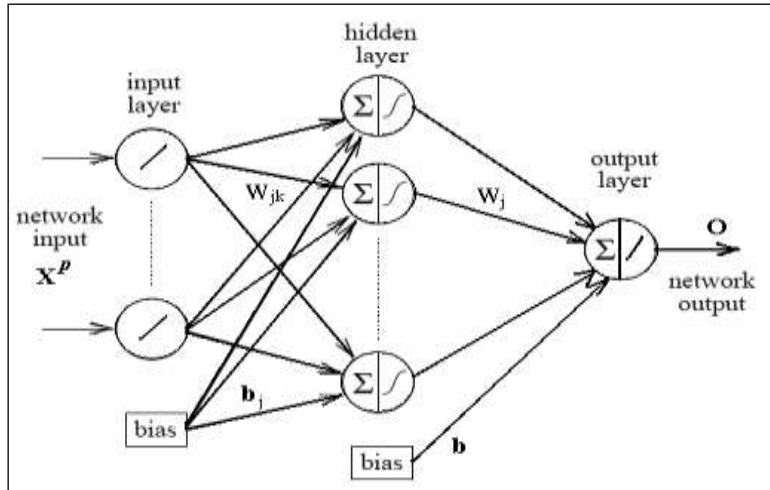
به منظور پیاده‌سازی الگوریتم BP باید تابع هزینه زیر کمینه گردد:

$$J(W) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M e_i^T e_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (Z_{pi} - O_i)^T (Z_{pi} - O_i), \quad O_i = \hat{Z}_{pi} \quad (۴-۵)$$

در رابطه فوق  $W$  برداری است که بایاس و وزن‌ها را شامل می‌شود. الگوریتم بیشترین شیب برای کمینه کردن هزینه فوق می‌تواند به صورت زیر به کار گرفته شود که در آن  $\alpha$  نرخ یادگیری است.

$$W_{k+1} = W_k + \alpha \left( -\frac{\partial e}{\partial W} \right)_{W=W_k} \quad (۵-۵)$$

شبکه عصبی MLPی که در شناسایی پیش‌بین و شبیه‌ساز برای مکان عمودی پلاسما در نظر گرفته شده است، دارای ساختاری با تنها یک لایه پنهان،  $h$  نرون در لایه پنهان و یک نرون در لایه خروجی و  $p$  ورودی می‌باشد که در شکل ۵-۱۴ آورده شده است.



شکل ۵-۱۴: شبکه عصبی MLP مورد نظر در شناسایی مکان عمودی پلاسما [۲۴]

ورودی‌های شبکه در لایه ورودی وارد و بعد از وزن‌دهی و گرفتن یک سطح ثابت کلی وارد یک تابع پایه غیرخطی می‌گردند. سپس، مجموع وزن‌دار خروجی آنها با بایاس دیگر از یک تابع خطی عبور می‌کند. در این صورت تابع دینامیکی شبکه به صورت زیر خواهد بود:

$$y(j) = \sum_{k=1}^p w_{jk} x(k) + b_j \quad (۶-۵)$$

$$o = \sum_{j=1}^h w_j f_j(y(j)) + b \quad (۷-۵)$$

که در آن  $o$  خروجی شبکه،  $f_j$  تابع خروجی برای نرون  $j$ ام از لایه پنهان،  $y(j)$  سطح فعال‌سازی تابع خروجی نرون  $j$ ام در لایه پنهان،  $h$  شماره نرون در لایه پنهان،  $p$  تعداد نرون‌های ورودی،  $w_j$  وزن متصل‌کننده نرون  $j$ ام لایه پنهان به نرون خروجی،  $w_{jk}$  وزن متصل‌کننده نرون  $k$ ام به نرون  $k$ ام لایه پنهان،  $b_j$  بایاس نرون  $j$ ام لایه پنهان و  $b$  هم بایاس موجود در نرون خروجی است. همان طوری که می‌دانیم در آموزش شبکه عصبی با روش نیوتن-گوس، ماتریس هسین به صورت رابطه (۸-۵) است [۴۱]:

$$H = J^T J \quad (۸-۵)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,1}^1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,2}^1} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{S^1,R}^1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{1,1}^1} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{1,2}^1} & \dots & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{S^1,R}^1} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \\ \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial w_{1,1}^1} & \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial w_{1,2}^1} & \dots & \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial w_{S^1,R}^1} & \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,1}^1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,2}^1} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{S^1,R}^1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \end{bmatrix} \quad \mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial v_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial v_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial v_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial v_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial v_N(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial v_N(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial v_N(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (9-5)$$

که در آن  $\mathbf{J}$  ماتریس ژاکوبین خطا می‌باشد.

اگر  $\mathbf{H}$  تکین<sup>۱</sup> باشد، دیگر روش فوق مناسب نخواهد بود زیرا:

$$\beta_{k+1} = \beta_k - [\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{V}(\mathbf{x}_k) \quad (10-5)$$

در صورتی که در الگوریتم LM با اضافه کردن ماتریس  $\mu \mathbf{I}$  به  $\mathbf{H}$ ،  $(\mathbf{H} + \mu \mathbf{I})$  از حالت تکین خارج می‌شود و پارامتر  $\beta$  قابل محاسبه خواهد بود:

$$\beta_{k+1} = \beta_k - [\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + \mu_k \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{V}(\mathbf{x}_k) \quad (11-5)$$

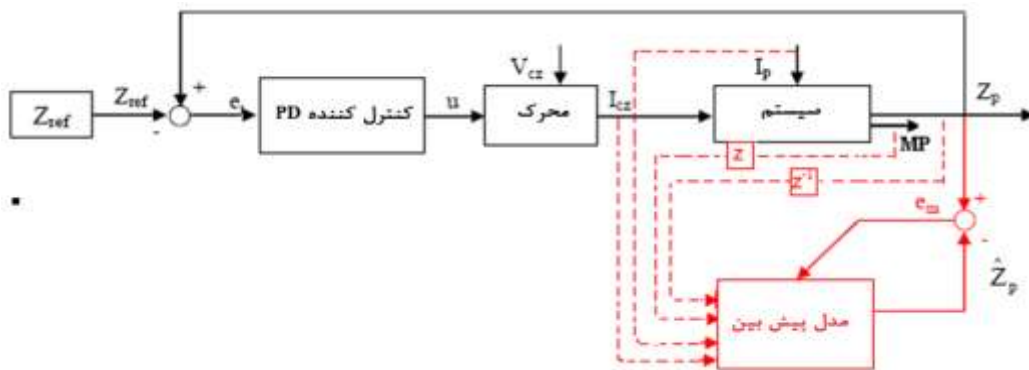
در این روش بعد از هر مرحله تعیین وزن‌ها،  $SSE^2$  با وزن‌های جدید محاسبه می‌گردد. اگر  $SSE$  جدید کوچکتر از مقدار مرحله‌ی قبلی باشد،  $\mu_k$  بر عدد ثابتی تقسیم و دوباره وزن‌ها به‌روز و برای ورودی‌های بعدی تکرار می‌شود. ولی اگر  $SSE$  جدید افزایش داشته باشد،  $\mu_k$  در عدد ثابتی ضرب و دوباره ماتریس ژاکوبین، هسین و وزن‌های جدید محاسبه می‌گردد.

1-Singular  
2-Sum Sauer Error

## ۴ ۵- ساختار مدل پیش‌بین جابجایی عمودی پلاسما در توکامک دماوند بر اساس

### حسگرهای مغناطیسی (MP)

ساختار مورد نظر برای طراحی مدل پیش‌بین، ساختار غیر خطی NARX انتخاب می‌شود که بر اساس آن، در شکل ۵-۱۵ بلوک دیاگرام کنترل مکان عمودی پلاسما به همراه تهیه مدل پیش‌بین در توکامک دماوند نشان داده شده است.

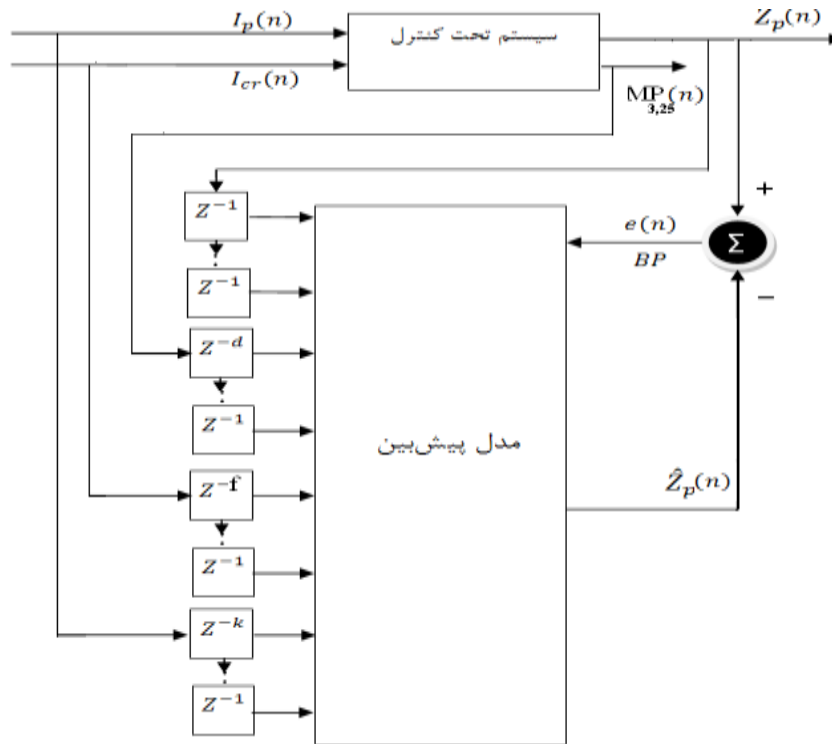


شکل ۵-۱۵: بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلاسما به همراه ساختار تهیه مدل پیش‌بین Plant در توکامک دماوند [۳۹]

در بلوک دیاگرام شکل معادلات کنترل‌کننده PD و روابط حاکم بر محرک دستگاه کاملاً مشخص می‌باشد. بنابراین از کل سیستم تنها روابط حاکم بر دینامیک جابجایی سیستم یعنی از  $I_{cz}$  به  $Z_p$  باقی می‌ماند که در این فصل به مدل‌سازی آن می‌پردازیم.

شکل ۵-۱۶ ساختار NARX مورد نظر را برای مدل پیش‌بین جابجایی عمودی پلاسما نشان می‌دهد. در این ساختار  $I_p$  جریان پلاسما،  $I_{cz}$  جریان پیچ‌های کنترلی،  $Z_p$  خروجی واقعی سیستم و  $\hat{Z}_p$  خروجی مدل و MP مقادیر خروجی حسگرهای مغناطیسی می‌باشد.





شکل ۵-۱۶: ساختار NARX مدل پیش‌بین در شناسایی جابجایی عمودی پلاسما [۲۰].

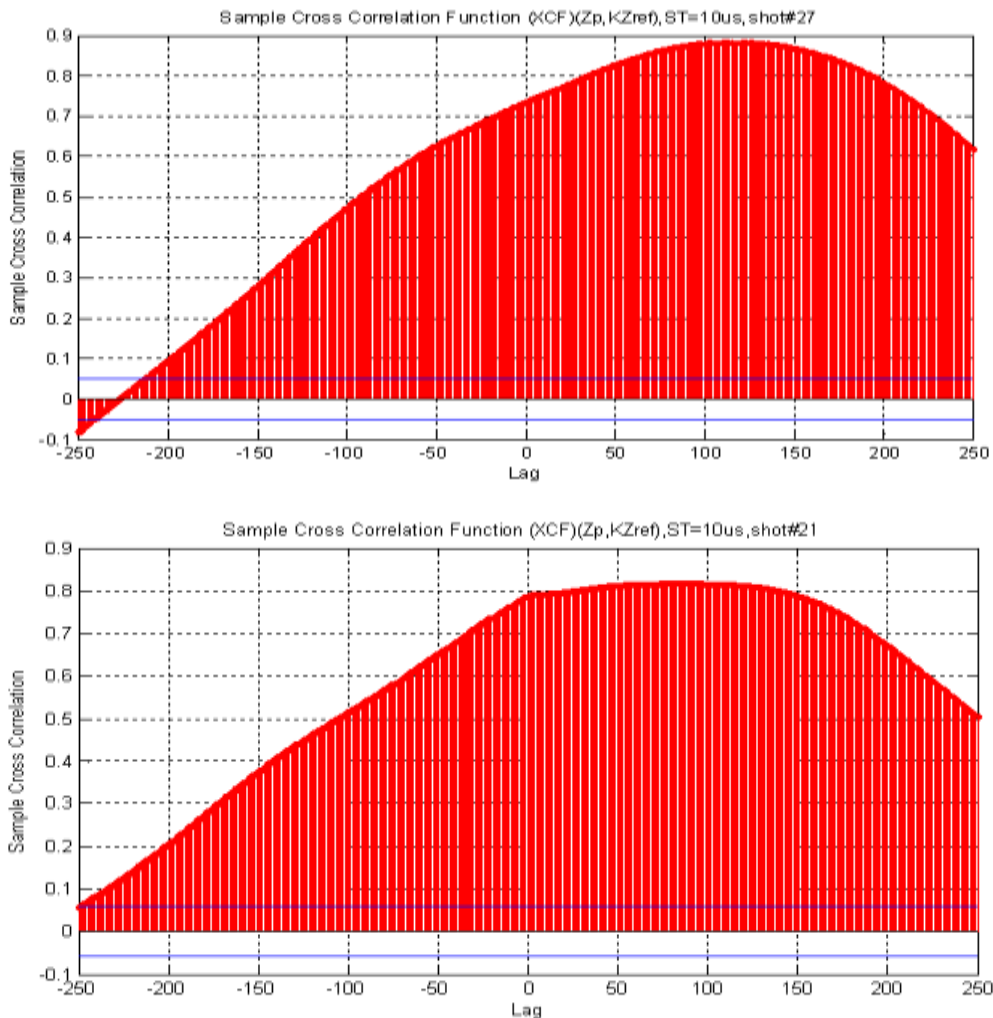
## ۵-۴-۱ - تخمین تأخیر ورودی‌های شبکه

اولین گام در شناسایی یک فرایند، محاسبه تأخیر خالص سیستم است. در صورتی که این تأخیر به درستی تخمین زده شود شناسایی فرایند به درستی انجام می‌شود. اما در غیر این صورت در شناسایی فرایند دچار مشکل خواهیم بود. روش‌های مختلفی جهت تخمین تأخیر یک سیستم وجود دارد. این روش‌ها شامل تحلیل همبستگی ارزی<sup>۱</sup>، آزمون پله و لپشیتز می‌باشند [۲۰]، [۳۰].

تأخیر جابجایی پلاسما به طور مستقیم وابسته به شدت جریان پلاسما است به طوری که با افزایش شدت جریان پلاسما، تأخیر جابجایی بیشتر می‌شود. از طرف دیگر میزان این تأخیر با جریان کنترلی یا به عبارتی با انرژی سیستم کنترل رابطه معکوس دارد به این معنا که با افزایش آن، تأخیر جابجایی کمتر می‌شود. در نتیجه جریان پلاسما ( $I_p$ ) و جریان کنترلی ( $I_{cz}$ ) دو عامل مهم در شناسایی و مدل‌سازی جابجایی هستند.

در این پروژه ابتدا از روش همبستگی ارزی برای تعیین تأخیر ورودی‌ها استفاده شد. البته شرایط استفاده از این روش این است که سیستم خطی باشد، طیف فرکانسی آن در محدوده فرکانس میانی باشد و سیگنال ویژگی‌های نویز سفید را داشته باشد. چون سیستم به صورت حلقه بسته می‌باشد و فیدبک باعث کاهش حساسیت نسبت به پارامترها شده و کل مجموعه را خطی‌تر می‌کند، آنالیز همبستگی را برای  $Z_p$  نسبت به  $Z_{ref}$  بررسی می‌کنیم. البته باید در نظر گرفت که  $140\ \mu s$  از مقدار تأخیری که بدست می‌آید مربوط به مدار محرک می‌باشد.

برای داده‌های چندین شات آنالیز همبستگی برای زمان نمونه‌برداری  $10\ \mu s$  انجام شد. به منظور کافی بودن تعداد داده‌ها برای آنالیز، این زمان نمونه‌برداری انتخاب شده است. نمودارهای حاصل از دو شات برای نمونه در شکل ۵-۱۷ آورده شده است.



شکل ۵-۱۷: نمودار تحلیل همبستگی به ترتیب برای داده‌های تست شماره ۲۱ و ۲۷

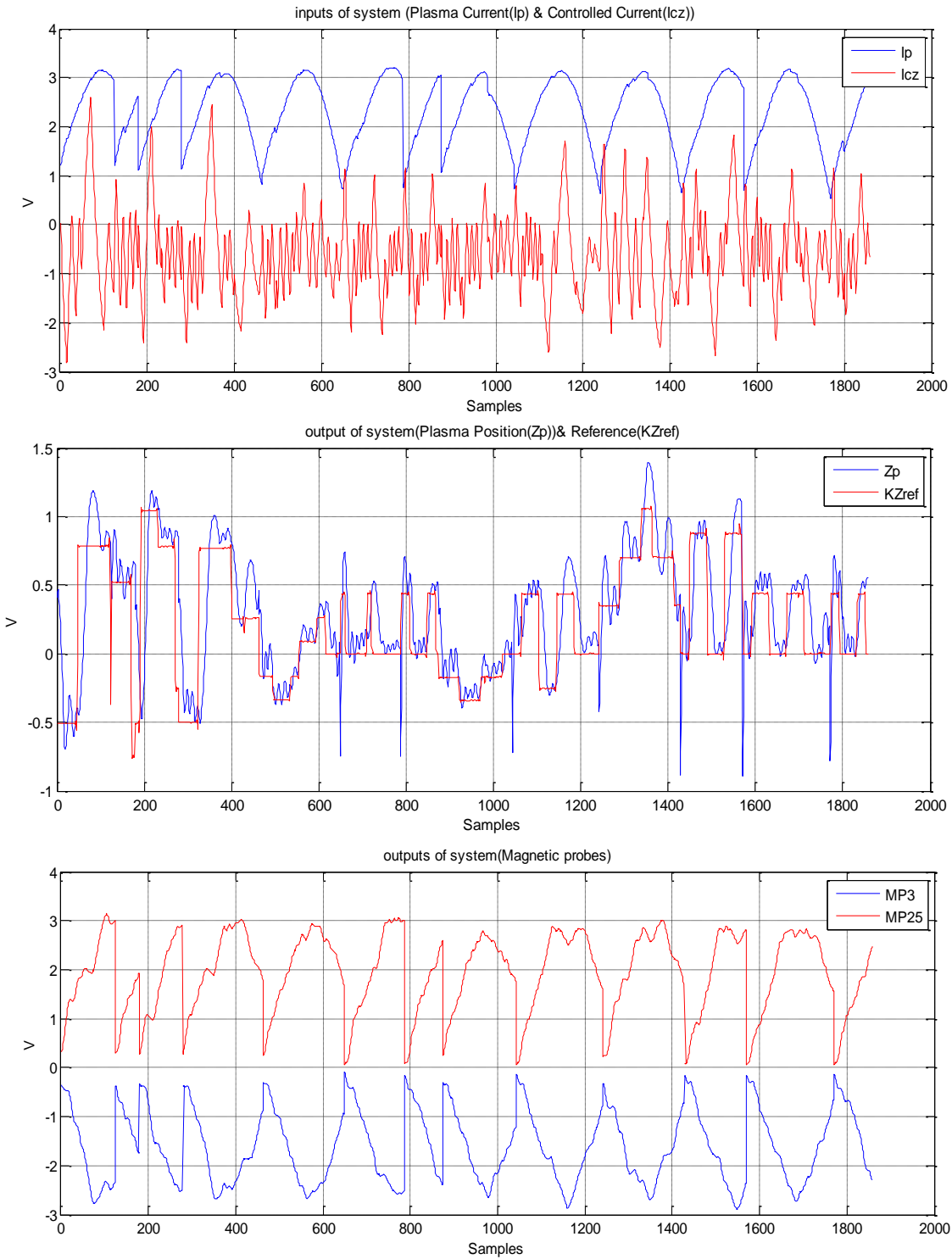
با توجه به شکل‌ها، تأخیر بدست آمده حداکثر می‌تواند  $1200 \mu\text{s}$  باشد. بنابراین این نتیجه حاصل می‌شود که نمی‌توان به طور کامل به نتایج تحلیل همبستگی اطمینان کرد و تأخیر ورودی‌ها را بدست آورد و تأخیر بدست آمده از نمودار می‌تواند در بازه صفر تا  $1200 \mu\text{s}$  باشد. در ادامه با بررسی داده‌های عملی سیستم و استفاده از روش آزمون پله، میزان تأخیر به صورت مجزا اندازه‌گیری شد.

تأخیر  $Z_P$  نسبت به ورودی‌های  $I_{CZ}$  و  $I_P$  به دلیل دینامیک حرکت پلاسما و میزان چگالی آن و تأخیر نفوذ میدان در پلاسما می‌باشد که برای جداسازی اثر هر کدام از آن‌ها مجبور به اندازه‌گیری تأخیر در عدم حضور دیگری هستیم. که با بررسی‌های انجام شده تأخیر  $Z_P$  از ورودی جریان پلاسما حدود  $10 \mu\text{s}$  می‌باشد. میزان تأخیر  $Z_P$  از  $I_{CZ}$  در شات‌های مختلف حدود  $200 \mu\text{s}$  است. از طرفی خروجی حسگرهای مغناطیسی نسبت به  $I_{CZ}$  حدود  $500 \mu\text{s}$  است. در نتیجه تأخیر MP نسبت به  $Z_P$  در حدود  $300 \mu\text{s}$  خواهد بود.

#### ۵ ۴ - انتخاب شات‌های مناسب و ترکیب آن‌ها برای آموزش شبکه

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد بنا به دلایل فیزیکی و ویژگی‌های سیستم توکامک، امکان اعمال سیگنال PRBS با فرکانس بالا و تعداد پالس زیاد در تستی به پهنای  $20 \text{ms}$  وجود ندارد. به همین دلیل مجبور بودیم سیگنال ورودی با پالس‌های متفاوت PRBS را در شات‌های مختلف اعمال کنیم و در نهایت با کنار هم قرار دادن این شات‌ها بتوانیم شبکه را آموزش دهیم. برای این کار کافی است از کل زمان محصورسازی پلاسما محدوده زمانی را در نظر بگیریم که شروع آن، شروع فرمان کنترل و انتهای آن اتمام فرمان کنترل پلاسما باشد، سپس با کنار هم قرار دادن این مجموعه داده‌ها شرایط مناسب برای آموزش شبکه را فراهم آوریم. شکل ۵-۱۸ نمونه‌ای از ترکیب شات‌های (۴، ۶، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۷، ۲۸، ۲۹) را برای تهیه مدل پیش‌بین و

شبیه‌ساز نشان می‌دهد. برای آموزش پارامترهای مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز از داده‌های ۱۱ شات برای آموزش شبکه و از داده‌های ۲ شات برای تست استفاده گردیده است.



شکل ۵-۱۸: نمونه‌ای از ترکیب شات‌ها برای تهیه مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز

## ۵ ۴ ۳ - نتایج مدل پیش‌بین جابجایی عمودی پلاسما در حالت حلقه بسته با

## حسگرهای MP

برای آموزش مدل پیش‌بین از ۱۱ شات با شماره‌های (۴، ۶، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۷، ۲۹) استفاده شده است که این مجموعه تقریباً جابجایی بیشتری از فضای محفظه پلاسما را تحت پوشش قرار می‌دهند. همچنین برای تست از شات‌های ۲۰ و ۲۸ استفاده شده است.

برای تهیه مدل پیش‌بین از یک شبکه MLP با یک لایه میانی و آموزش به کمک الگوریتم LM استفاده نموده‌ایم.

برای آموزش پارامترهای مدل پیش‌بین، ابتدا لازم است تعداد نرون‌های بهینه لایه میانی و تعداد دفعات آموزش بهینه تعیین شوند. برای این منظور میانگین مجموع مربعات خطا<sup>۱</sup> به صورت زیر معرفی می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (Z_p - \hat{Z}_p)^2 \quad (۵-۱۲)$$

برای بهینه کردن تعداد تکرار آموزش در شبکه MLP لازم است اثر افزایش تعداد حلقه تکرار در آموزش<sup>۲</sup> بررسی شود، بدین صورت که با افزایش تعداد تکرار در هر بار میانگین مجموع مربعات خطا برای مجموعه داده‌های آموزش و تست محاسبه می‌گردد. در این محاسبه برای داده‌های آموزش، با افزایش تعداد تکرارها آموزش شبکه بهتر شده و میانگین مجموع مربعات خطا کاهش می‌یابد. ولی در مورد داده‌های تست، با بزرگتر کردن تعداد تکرارها، میانگین مجموع مربعات خطا ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در واقع افزایش تعداد تکرارها لزوماً جواب بهتری را به دنبال ندارد. زیرا در صورت تکرار زیاد، به دلیل پدیده آموزش بیش از حد<sup>۳</sup> اغتشاش‌ها و نویزهای موجود در داده‌ها توسط شبکه آموخته می‌شود. بنابراین تعداد تکرارها را باید در حد

1-MSE(Mean Square Error)

2-Epoch

3-Over train

معقول در نظر گرفت. محل مینیمم شدن میانگین مجموع مربعات خطا در داده‌های تست نشان دهنده تعداد تکرار بهینه برای شبکه مورد نظر است.

برای محاسبه تعداد نرون بهینه به ازای نرون‌های مختلف، میانگین مجموع مربعات خطا برای داده‌های تست را محاسبه می‌نماییم. محل مینیمم شدن این مقدار در داده‌های آزمایش نشان دهنده تعداد نرون‌های بهینه لایه میانی می‌باشد.

از طرفی وزن‌های اولیه شبکه نیز در بهینه شدن خروجی نهایی شبکه مؤثر می‌باشد. به منظور رسیدن به حالتی که وزن‌های اولیه و تعداد نرون و تعداد دفعات آموزش همزمان بهینه باشند، برای ۵ حالت تصادفی وزن‌های اولیه شبکه، تعداد نرون را از ۱ تا ۲۰ تغییر داده و شبکه به ازای هر نرون با وزن‌های اولیه انتخاب شده، ۶۰۰ بار آموزش داده شد. در ادامه به ازای هر نرون، میانگین مجموع مربعات خطا در بهترین شرایط اولیه برای شبکه و تعداد دفعات آموزش محاسبه شد.

در این شبکه بردار دینامیک‌های ورودی به ۳ صورت متفاوت زیر انتخاب شد.

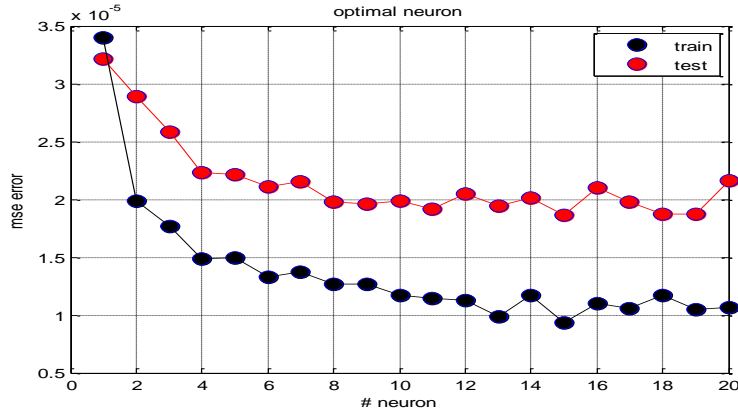
$$[mp_3(i+3); mp_{25}(i+3); z_p(i-1); z_p(i-2); z_p(i-3); I_p(i); I_{cz}(i-3); I_{cz}(i-2)] \quad (۱۳-۵)$$

$$[mp_3(i+3); mp_3(i+2); mp_{25}(i+3); mp_{25}(i+2); z_p(i-1); z_p(i-2); I_p(i); I_{cz}(i-3); I_{cz}(i-2)] \quad (۱۴-۵)$$

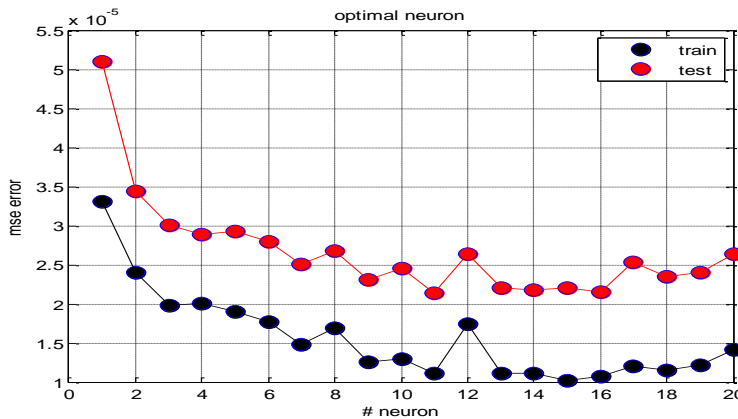
$$[mp_3(i+3); mp_3(i+2); mp_{25}(i+3); mp_{25}(i+2); z_p(i-1); z_p(i-2); z_p(i-3); I_p(i); I_{cz}(i-3); I_{cz}(i-2)] \quad (۱۵-۵)$$

در شکل ۵-۱۹، شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ به ترتیب منحنی تغییرات میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش و تست را به ازای مقادیر مختلف نرون‌های لایه میانی در شرایط بیان شده برای دسته ورودی رابطه (۱۳-۵)، (۱۴-۵) و (۱۵-۵) نشان داده شده است. شکل موج‌های خروجی مدل، خروجی واقعی سیستم در حالت بهینه برای دسته ورودی رابطه تا به ترتیب در شکل ۵-۲۲، شکل ۵-۲۳ و شکل ۵-۲۴ آورده شده است. در ادامه نمودار میانگین مجموع مربعات خطا برای

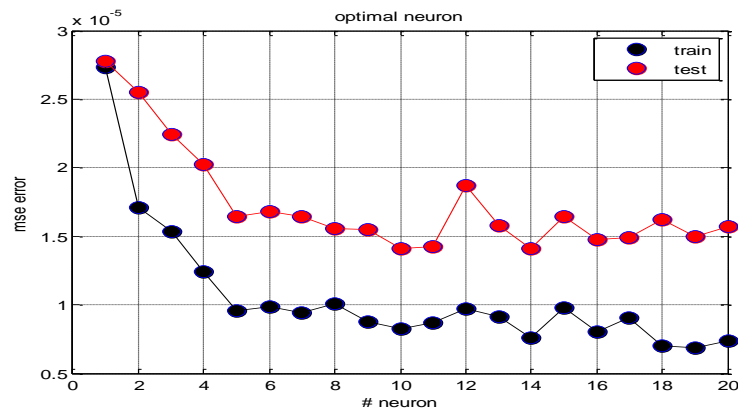
داده‌های آموزش و آزمایش برای دسته ورودی رابطه تا به ترتیب در شکل ۵-۲۵، شکل ۵-۲۶ و شکل ۵-۲۷ نشان داده شده است.



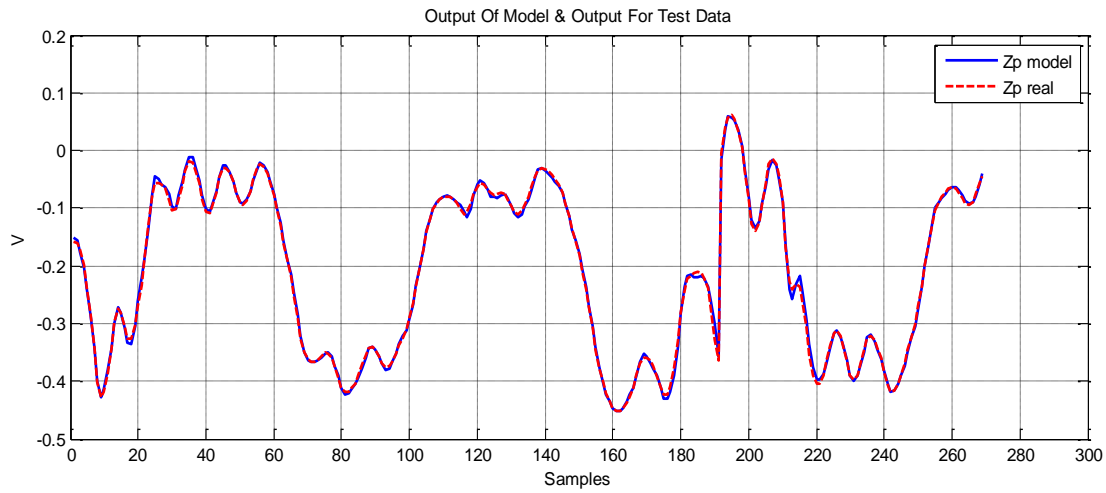
شکل ۵-۱۹: منحنی تغییرات MSE خطای داده‌های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش برای بردار ورودی اول



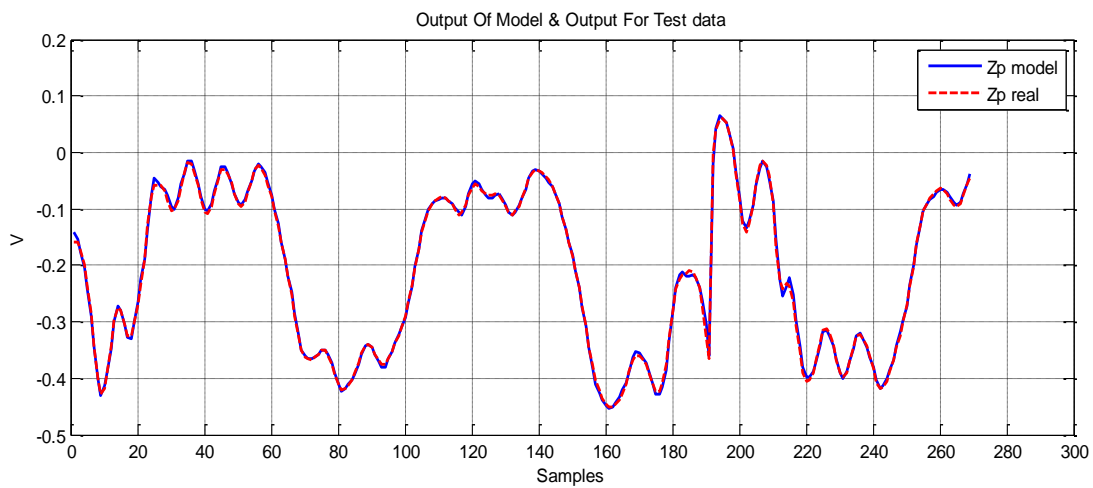
شکل ۵-۲۰: منحنی تغییرات MSE خطای داده‌های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش برای بردار ورودی دوم



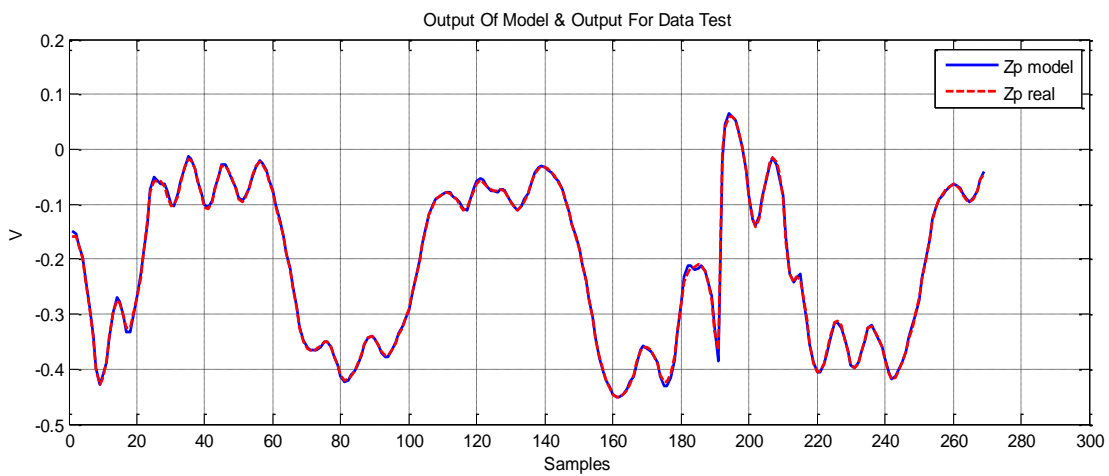
شکل ۵-۲۱: منحنی تغییرات MSE خطای داده‌های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش برای بردار ورودی سوم



شکل ۵-۲۲: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین  $Z_p$  با بردار ورودی اول، ۱۵ نرون و ۳۸۲ بار آموزش

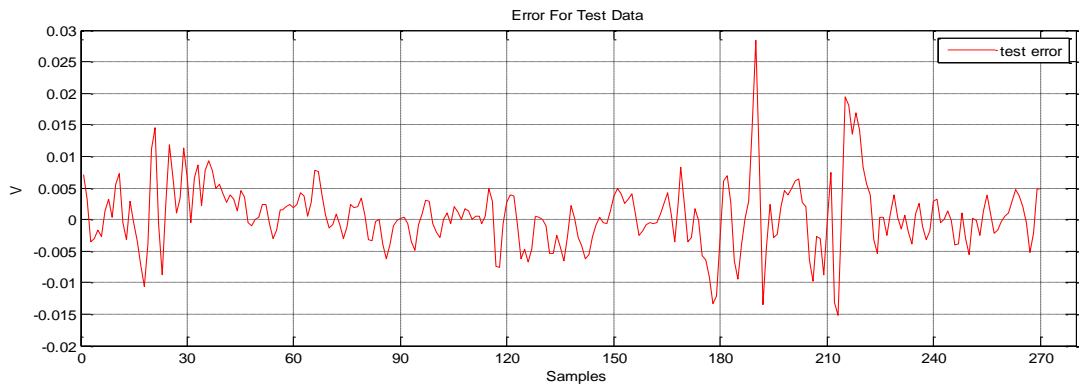
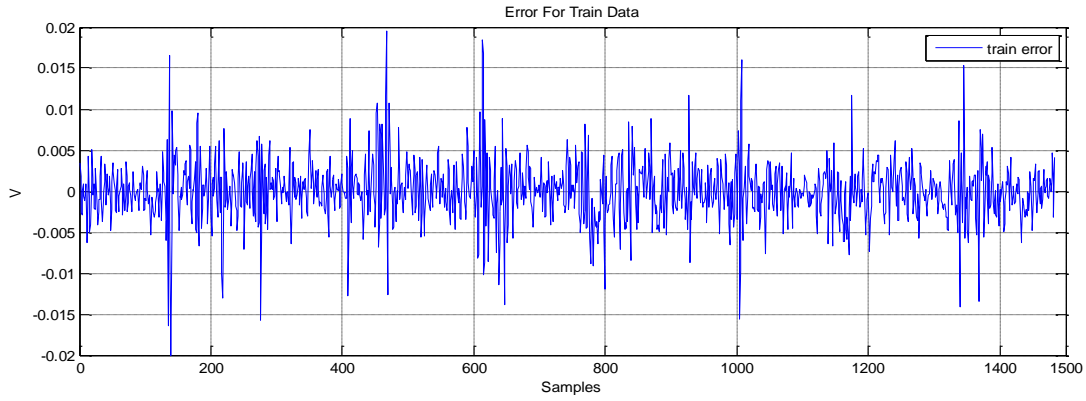


شکل ۵-۲۳: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین  $Z_p$  با بردار ورودی دوم، ۱۱ نرون و ۳۸۰ بار آموزش

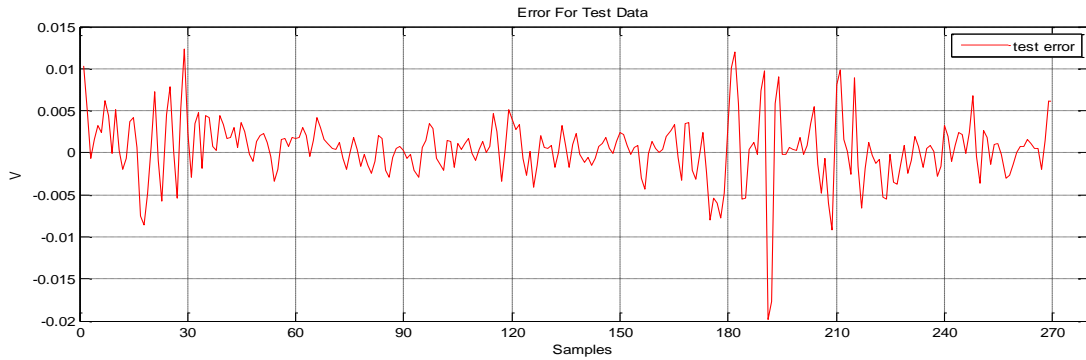
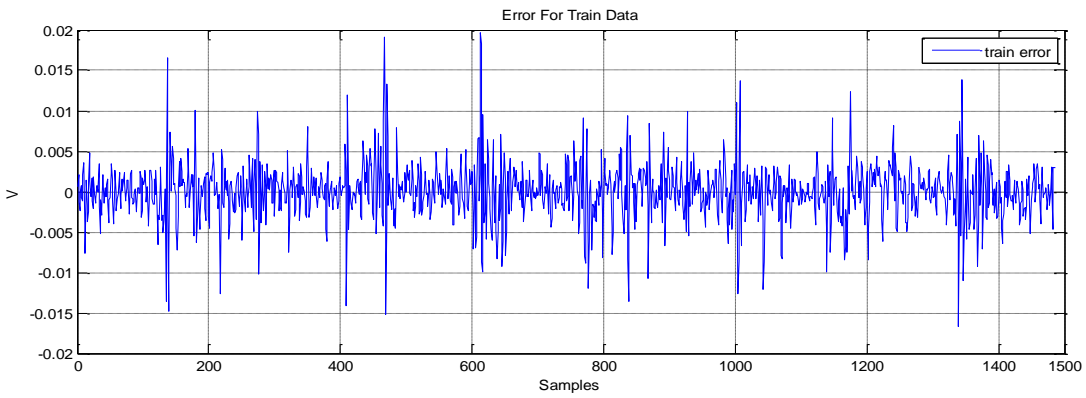


شکل ۵-۲۴: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین  $Z_p$  با بردار ورودی سوم، ۱۰ نرون و ۵۳۶ بار آموزش

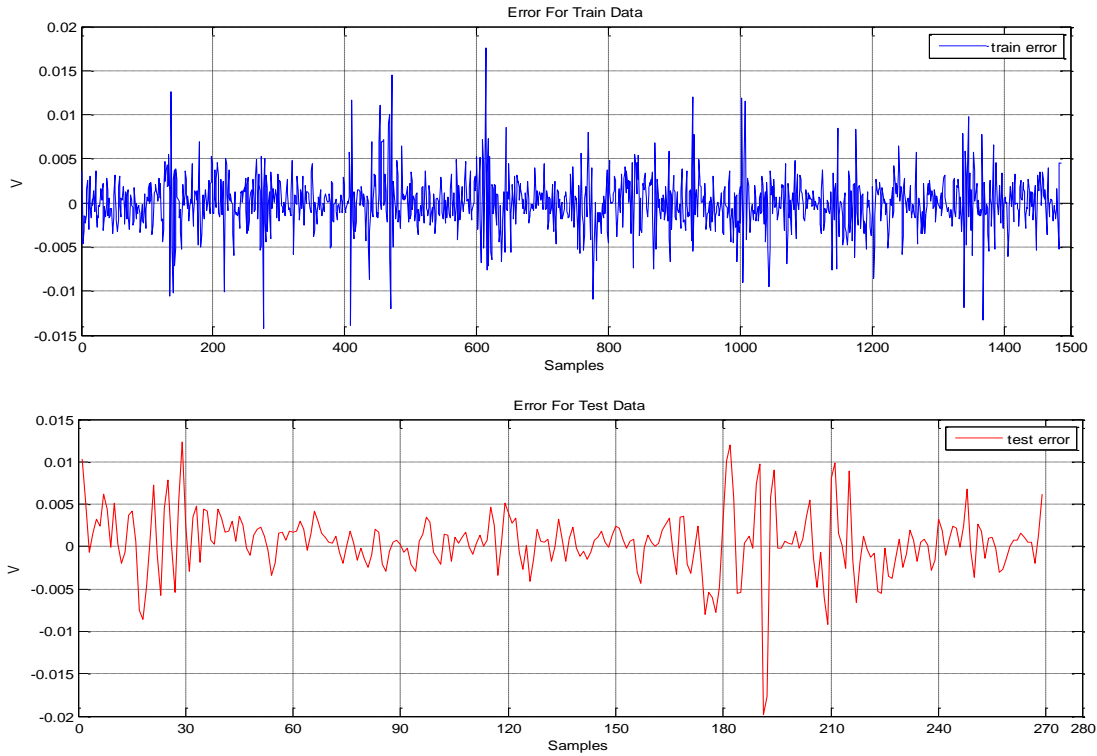




شکل ۵-۲۵: شکل موج خطای داده‌های آموزش و تست مدل پیش‌بین  $Z_p$  با بردار ورودی اول



شکل ۵-۲۶: شکل موج خطای داده‌های آموزش و تست مدل پیش‌بین  $Z_p$  با بردار ورودی دوم



شکل ۵-۲۷: شکل موج خطای داده‌های آموزش و تست مدل پیش‌بین  $Z_p$  با بردار ورودی سوم

میانگین مجموع مربعات خطا برای هر یک در شرایط بهینه محاسبه شد. نتایج محاسبات در جدول ۵-۱ قابل ملاحظه است.

جدول ۵-۱: مقایسه نتایج مدل پیش‌بین  $Z_p$  برای ۳ بردار ورودی متفاوت

بردار ورودی	تعداد نرون بهینه	تعداد دفعات آموزش بهینه	میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های آزمایش	میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش
رابطه (۱۳-۵)	۱۵	۳۸۲	$0.1867 \times 10^{-4}$	$0.934 \times 10^{-4}$
رابطه (۱۴-۵)	۱۱	۳۸۰	$0.2138 \times 10^{-4}$	$0.1107 \times 10^{-4}$
رابطه (۱۵-۵)	۱۰	۵۳۶	$0.1400 \times 10^{-4}$	$0.8152 \times 10^{-4}$

با مقایسه مقادیر میانگین مجموع مربعات خطا برای داده‌های تست و با توجه به اینکه معیار مورد نظر برای مدل بهینه دارا بودن مینیمم میانگین مجموع مربعات خطا است، به این نتیجه می‌رسیم که بردار ورودی مطابق رابطه (۱۵-۵) و شبکه با ۱۰ نرون و ۵۳۶ بار آموزش، بهترین نتیجه را برای شناسایی مدل بدست می‌دهد.

## ۵ ۵ مدل شبیه‌ساز مکان عمودی پلازما در توکامک

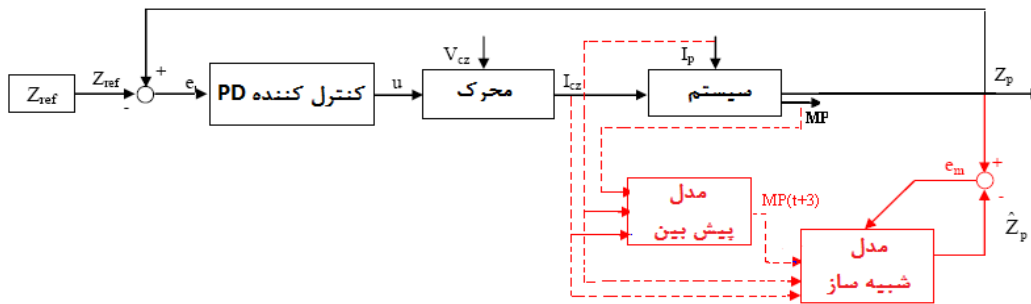
همان‌طوری که قبلاً بیان شد معادلات حرکت و جابجایی پلازما در محفظه توکامک به دلیل ویژگی‌های فیزیکی سیستم بسیار پیچیده و دارای دینامیک غیر خطی می‌باشد. بنابراین برای کنترل و جابجایی پلازما در سطوح مختلف باید کنترل‌کننده غیرخطی و راه‌انداز سریع با انرژی اولیه بهینه بر اساس ساختار فیزیکی سیستم طراحی شود که مقدمه آن داشتن مدل شبیه‌ساز از دستگاه می‌باشد تا بر اساس مدل پایه سیستم، کنترل‌کننده‌های غیرخطی و راه‌اندازهای سریع و مناسبی به لحاظ انرژی طراحی و شبیه‌سازی شود. با کامل نمودن مدل پایه سیستم برای جابجایی‌ها و شکل پلازما می‌توان سطوح شار را بر اساس داده‌های اولیه مدل نمود و بدون نیاز به حل تعداد زیادی از معادلات پیچیده سیستم، می‌توان شکل و بسیاری از پارامترهای مهم پلازما را شبیه‌سازی و بر اساس آن کنترل‌کننده‌های مناسبی را طراحی کرد.

پس از تکمیل مدل شبیه‌ساز، برای طراحی کنترل‌کننده و راه‌انداز سیستم، لازم است که به جای دستگاه واقعی جایگزین گردد. بنابراین دیگر نمی‌توان از خروجی‌های اصلی سیستم برای محاسبه خروجی مدل استفاده نمود. در نتیجه ساختار مدل مورد نظر به صورت NOE انتخاب می‌گردد که در آن بخش از ورودی‌های شبکه از خروجی‌های تأخیر یافته خود مدل به جای خروجی‌های تأخیر یافته دستگاه واقعی در مدل پیش‌بین خواهد بود.

### ۵ ۵ - ۴ ساختار مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلازما

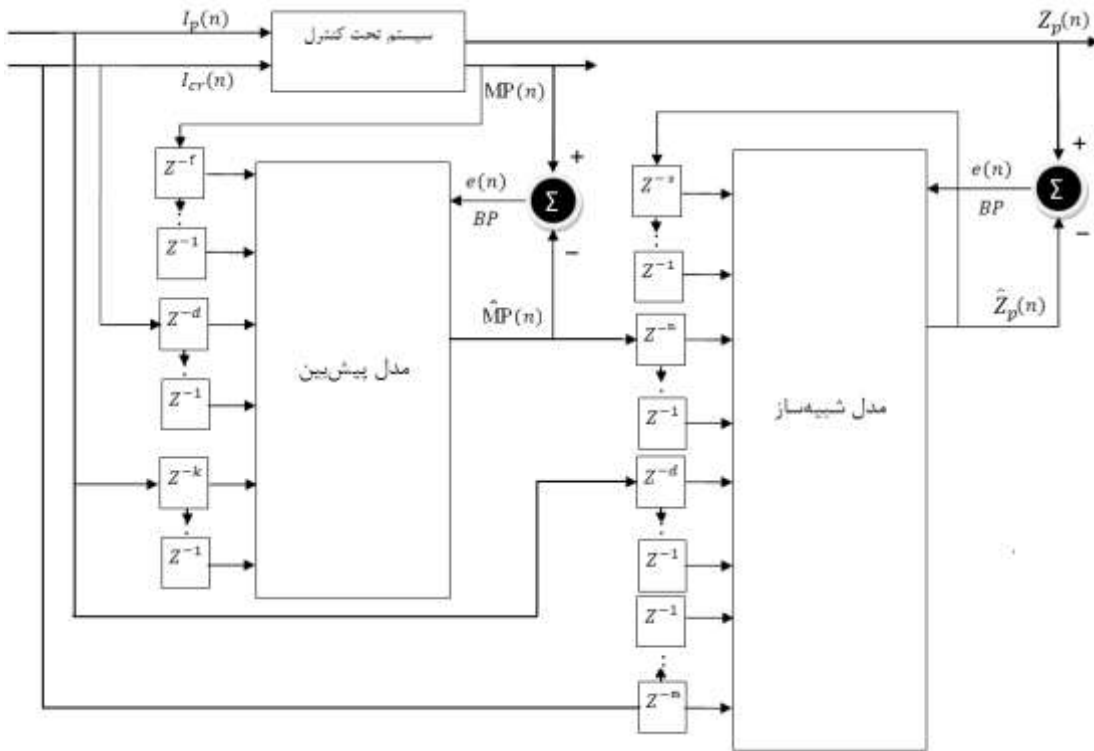
در شکل ۵-۲۸ بلوک دیاگرام کنترل مکان عمودی پلازما به همراه مدل شبیه‌ساز مکان عمودی پلازما بر اساس حسگرهای مغناطیسی برای توکامک دماوند نشان داده شده است. در این شکل، با توجه به سیستم کنترل حلقه بسته موجود، داده‌های عملی سیستم بر اساس ورودی PRBS در  $Z_{ref}$  تولید و با مشخص بودن معادلات قسمت‌های دیگر سیستم حلقه بسته به غیر از مدل دستگاه، شبیه‌ساز آن به صورت مستقیم تهیه می‌گردد. از آنجائیکه سیگنال حسگرهای

مغناطیسی (MP) نسبت به  $Z_p$  تأخیر دارند، در ورودی مدل شبیه‌ساز به مقادیر زمان‌های بعدی حسگرهای مغناطیسی (در حدود ۳ تأخیر) نیاز داریم. بنابراین برای تهیه مدل شبیه‌ساز از داده‌های حسگرهای مغناطیسی، لازم است از داده‌های آینده این سیگنال به عنوان ورودی مدل استفاده شود. بر این اساس ۳ نمونه بعدی این سیگنال‌ها (MP3 و MP25) پیش‌بینی گردیده و در ادامه به همراه سیگنال‌های  $I_p$  و  $I_{cz}$  و دینامیک‌های آن‌ها به مدل شبیه‌ساز اعمال گردد. در نتیجه برای پیش‌بینی ۳ نمونه بعدی سیگنال‌های MP مدل پیش‌بینی طراحی می‌کنیم که ۳ گام آینده از سیگنال‌های MP را تخمین بزند و تخمین گام‌های بعدی آن را به مدل شبیه‌ساز اعمال می‌کنیم و در نهایت مدل شبیه‌ساز خروجی را مدل خواهد کرد.



شکل ۵-۲۸: بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترل مکان عمودی پلاسما به همراه ساختار تهیه مدل شبیه‌ساز Plant در توکامک دماوند [۲۰]

برای شناسایی مدل شبیه‌ساز دستگاه، مدل NOE و برای شناسایی مدل پیش‌بین مقادیر حسگرهای مغناطیسی، از مدل NARX استفاده می‌شود. پارامترهای مدل بر اساس ساختار شبکه‌های MLP و تخمین پارامترهای آن با آموزش BP می‌باشد. شکل ۵-۲۹ ساختار NOE و NARX مورد نظر برای شناسایی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۹: ساختار مدل شبیه‌ساز در شناسایی جابجایی عمودی پلاسما [۲۴]

### ۵-۴ - مدل پیش‌بین خروجی حسگرهای مغناطیسی

در این بخش برای خروجی هر یک از حسگرهای مغناطیسی مورد استفاده، مدل پیش‌بین ارائه می‌گردد. از آنجایی که از خروجی این مدل به عنوان ورودی شبکه شبیه‌ساز  $Z_p$  استفاده خواهد شد. این مدل (پیش‌بین) به صورت مستقل از مدل شبیه‌ساز آموزش داده می‌شود. بنابراین مدل NARX بر اساس شبکه عصبی با روش آموزش LM مورد بررسی قرار گرفت.

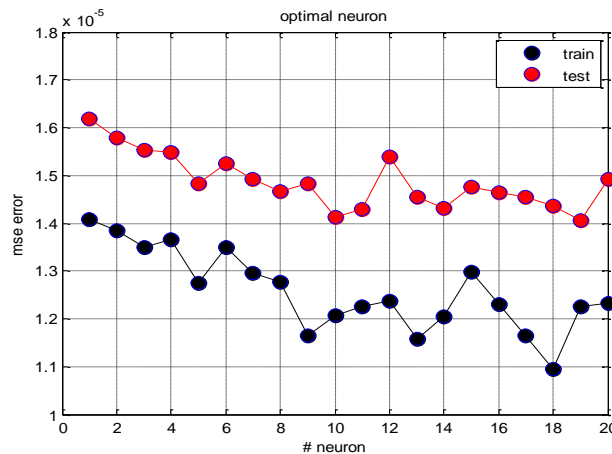
برای آموزش شبکه عصبی از ۱۱ شات با شماره‌های (۴، ۶، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۷، ۲۹) استفاده شده گردید. این مجموعه تقریباً جابجایی بیشتری از فضای محفظه پلاسما را تحت پوشش قرار می‌دهند. همچنین برای ارزیابی مدل، از شات‌های ۲۰ و ۲۸ استفاده گردید.

برای تولید مدل خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۳، بردار دینامیک‌های ورودی به صورت رابطه (۵-۱۶) و برای تولید مدل خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۲۵ بردار دینامیک‌های ورودی به صورت رابطه (۵-۱۷) انتخاب شد.

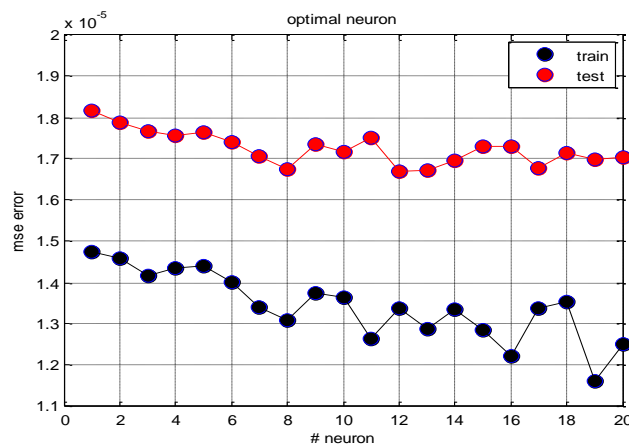
$$[MP3(i-1) ; MP3(i-2) ; Ip(i-3) ; Icz(i-5) ; Icz(i-6)] \quad (۱۶-۵)$$

$$[MP25(i-1) ; MP25(i-2) ; Ip(i-3) ; Icz(i-5) ; Icz(i-6)] \quad (۱۷-۵)$$

در این شبکه‌ها نیز برای یافتن تعداد نرون‌های بهینه لایه میانی و تعداد دفعات آموزش بهینه همانند روند گفته شده بخش قبل انجام شد. منحنی تغییرات میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش و تست را به ازای مقادیر مختلف نرون‌های لایه میانی در شرایط بیان شده برای مدل خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۳ و مدل خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۲۵ به ترتیب در شکل ۳۰-۵ و شکل ۳۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳۰-۵: منحنی تغییرات MSE خطای داده‌های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش



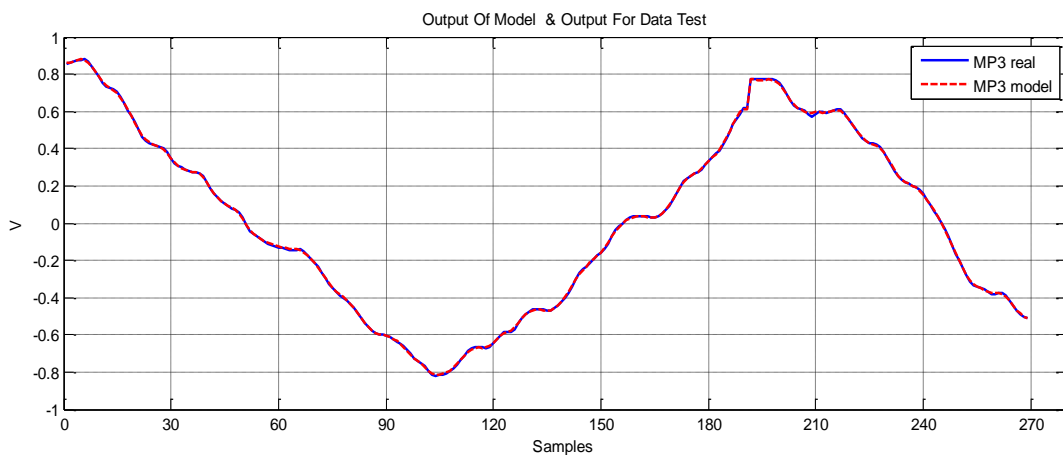
شکل ۳۱-۵: منحنی تغییرات MSE خطای داده‌های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش

همانطور که در نمودارهای بالا مشخص است برای حسگر مغناطیسی شماره ۳ شبکه با ۱۰ نرون و برای حسگر مغناطیسی شماره ۲۵، شبکه با ۱۲ نرون بهترین نتیجه را برای شناسایی مدل حسگر مغناطیسی بدست می‌دهد که مشخصات تعداد نرون و تعداد دفعات آموزش شبکه بهینه و خطای داده‌های آموزش و تست در جدول ۲-۵ آورده شده است

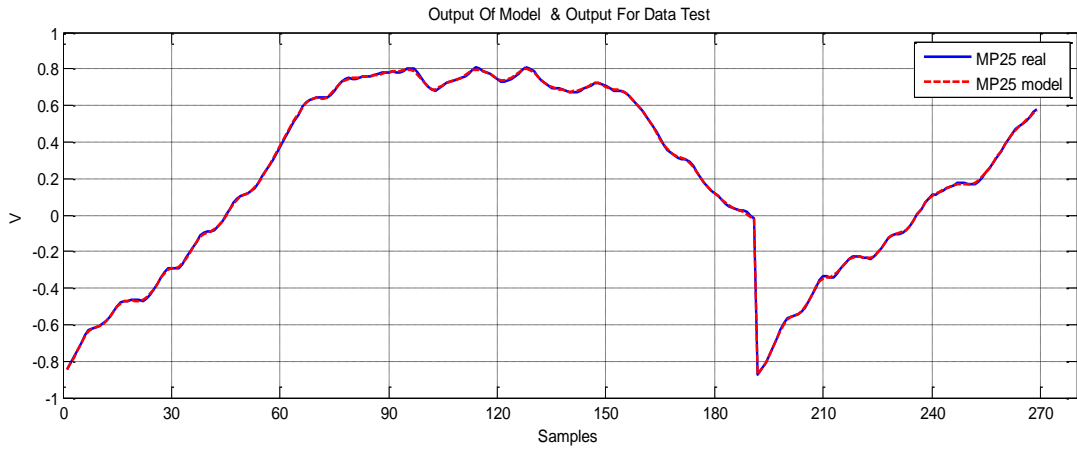
جدول ۲-۵: مشخصات شبکه بهینه برای مدل پیش‌بین خروجی حسگرهای مغناطیسی

شماره حسگر	تعداد نرون بهینه	تعداد دفعات آموزش بهینه	میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های تست	میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش
۳	۱۰	۸۶	$14 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
۲۵	۱۲	۸۰	$16 \times 10^{-6}$	$13 \times 10^{-6}$

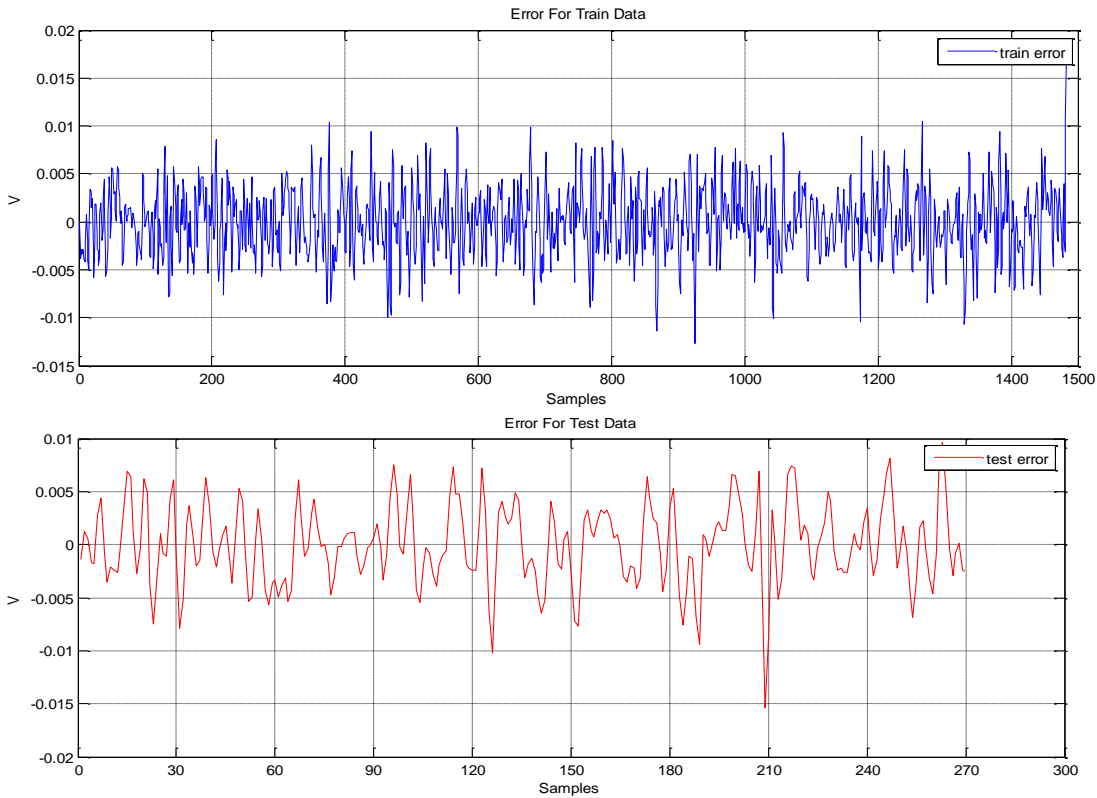
شکل موج‌های خروجی مدل، خروجی واقعی سیستم و نمودار میانگین مجموع مربعات خطا برای داده‌های آموزش و تست در حالت بهینه برای دو مدل بیان شده به ترتیب در شکل ۳۲-۵ و شکل ۳۳-۵ آورده شده است. در ادامه نمودار میانگین مجموع مربعات خطا برای داده‌های آموزش و تست حالت بهینه برای دو مدل بیان شده به ترتیب در شکل ۳۴-۵ و شکل ۳۵-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳۲-۵: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۳ برای شات‌های ۲۰ و ۲۸

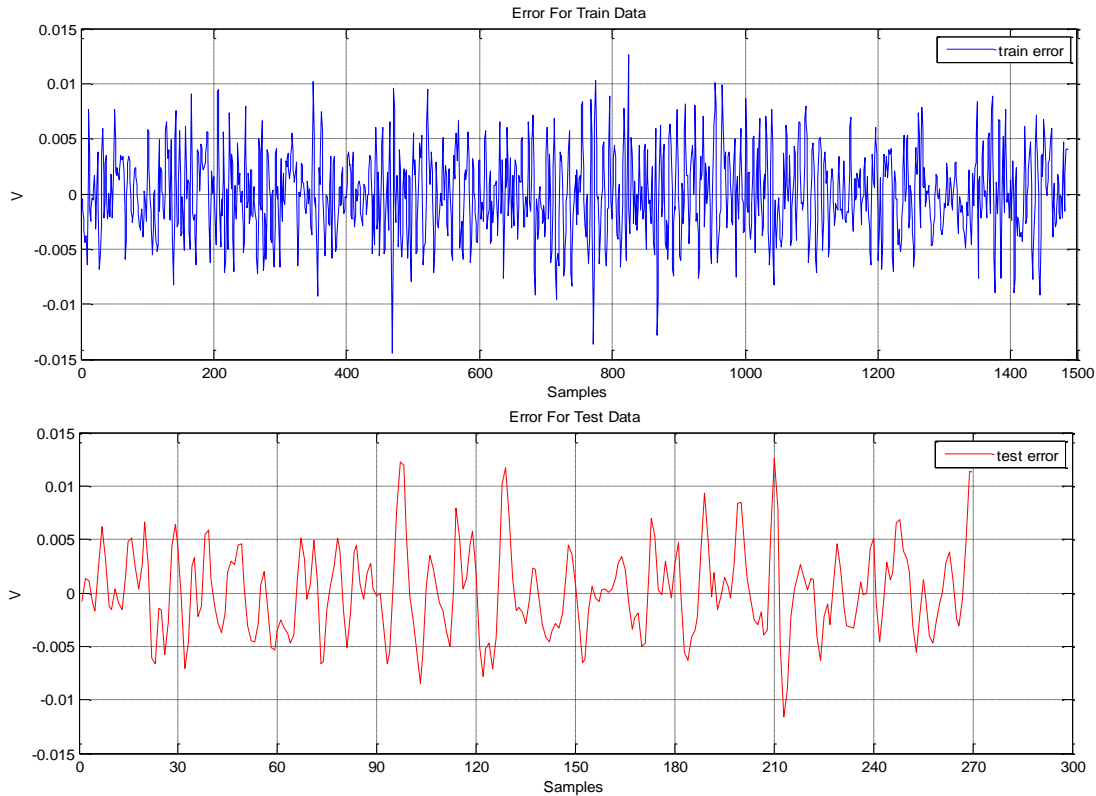


شکل ۵-۳۳: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۲۵ برای شات‌های ۲۰ و ۲۸



شکل ۵-۳۴: سیگنال خطای داده‌های آموزش و تست مدل پیش‌بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۳





شکل ۵-۳: سیگنال خطای داده‌های آموزش و تست مدل پیش‌بین خروجی حسگر مغناطیسی شماره ۲۵

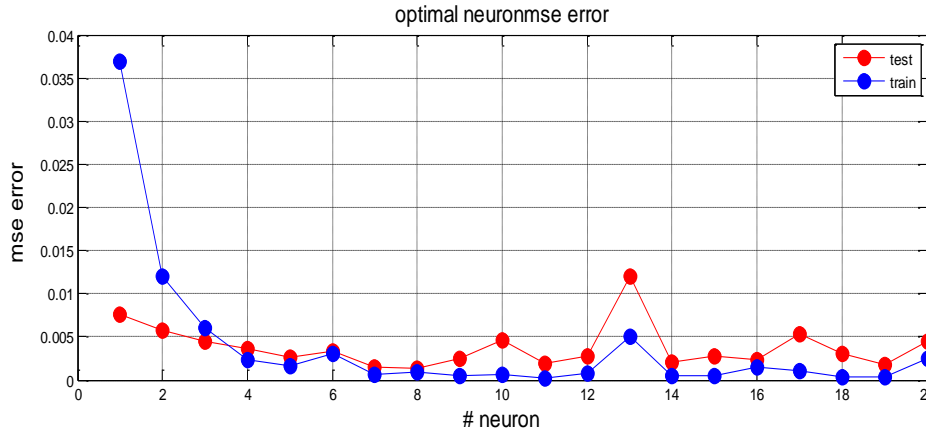
## ۵ ۴ - مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما

با توجه به بلوک دیاگرام شکل ۵-۲۹، در این بخش مدل شبیه‌ساز مورد استفاده تشریح می‌گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، این مدل (شبیه‌ساز) نیز به صورت مستقل از مدل پیش‌بین آموزش داده می‌شود. بنابراین مدل NOE بر اساس شبکه عصبی با روش آموزش LM مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای آموزش شبکه عصبی از ۱۱ شات با شماره‌های (۴، ۶، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۷، ۲۹) استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی مدل شات‌های ۲۰ و ۲۸ استفاده می‌شود. بردار دینامیک‌های ورودی به صورت رابطه (۵-۱۸) انتخاب می‌گردد.

$$[MP3(i+3); MP3(i+2); MP25(i+2); MP25(i+3); Ip(i); Icz(i-3); Icz(i-2)] \quad (5-18)$$

در این شبکه نیز برای یافتن تعداد نرون‌های بهینه لایه میانی و تعداد دفعات آموزش بهینه همانند روند گفته شده برای مدل پیش‌بین  $Z_p$  عمل شد. منحنی تغییرات میانگین مجموع مربعات

خطای داده‌های آموزش و تست را به ازای مقادیر مختلف نرون‌های لایه میانی در شرایط بیان شده برای مدل به صورت شکل ۳۶-۵ است.



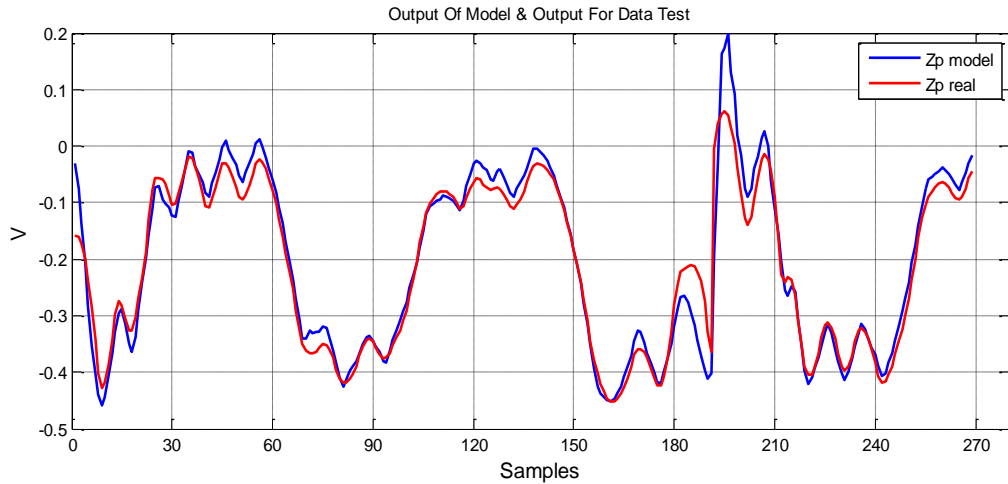
شکل ۳۶-۵: منحنی تغییرات MSE خطای داده‌های آموزش و تست به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی در تعداد دفعات بهینه آموزش

همان‌طور که در شکل بالا نیز مشخص است شبکه با ۸ نرون به حالت بهینه دست یافت که مشخصات تعداد نرون و تعداد دفعات آموزش شبکه بهینه و خطای داده‌های آموزش و تست در جدول ۳-۵ آورده شده است.

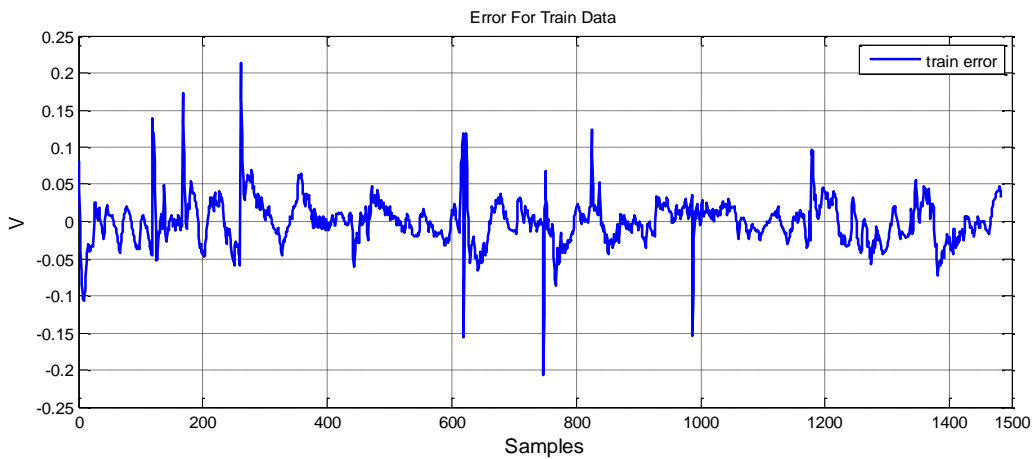
جدول ۳-۵: مشخصات شبکه بهینه برای مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما

تعداد نرون بهینه	تعداد دفعات آموزش بهینه	میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های تست	میانگین مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش
۸	۳۵۰	$13 \times 10^{-4}$	$91 \times 10^{-4}$

نمودار موج‌های خروجی مدل و خروجی واقعی سیستم و نمودار میانگین مجموع مربعات خطا برای داده‌های آموزش و تست در حالت بهینه به ترتیب در شکل ۳۷-۵ و شکل ۳۸-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۷: مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما



شکل ۵-۳۸: سیگنال خطای داده‌های آموزش و تست مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما

همانطور که در شکل ۵-۳۷ دیده می‌شود سیگنال حاصل از مدل شبیه‌ساز با تقریب خوبی سیگنال واقعی را دنبال می‌کند. مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما، با خطای تست برابر  $13 \times 10^{-4}$  (برای شات انتخاب شده به صورت رندم با ۲۷۰ نمونه) بدست آمد که نسبت به مدل

بدست آمده با استفاده از حسگرهای حلقه زینی در [۱۹] که خطای تست در شات انتخاب شده برای تست، در مدل بهینه آن  $59 \times 10^{-4}$  (نمونه ۱۴۰) بود، بهبود داشته است. از طرفی هر چه دامنه جابجایی پلاسما بیشتر باشد سیستم غیرخطی‌تر عمل می‌کند و در نتیجه مدل خطای بیشتری خواهد داشت، از آنجائیکه در این پروژه دامنه جابجایی پلاسما بیشتر بوده است، بنابراین یکی دیگر از برتری‌های مدل بدست آمده این است که با وجود بالا رفتن میزان خاصیت غیرخطی بودن سیستم، بازهم خطا کمتر از مدل بدست آمده در [۱۹] است. دلیلی که برای این بهبود می‌توان گفت، استفاده از داده‌های حسگرهای مغناطیسی به عنوان ورودی می‌باشد زیرا این حسگرها هم، اطلاعاتی راجع به دینامیک سیستم در بر دارد که در مدل‌سازی‌های قبلی در نظر گرفته نشده بود.

### نتیجه‌گیری

در این فصل شناسایی مدل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه مدل‌های پیش‌بین و شبیه‌ساز غیرخطی برای جابجایی عمودی پلاسما در توکامک دماوند با استفاده از حسگرهای مغناطیسی بر اساس داده‌های عملی از سیستم طراحی و شبیه‌سازی گردید. در شبیه‌سازی مدل پیش‌بین از شبکه تک لایه MLP با آموزش به روش LM با ۳ بردار ورودی مختلف انجام شده و با هم مقایسه شده است. توجه به داده‌های تست شبکه، نشان‌دهنده تخمین خوبی از داده‌های تجربی سیستم است. سپس مدل شبیه‌ساز با یک شبکه MLP تک لایه با آموزش به روش LM شبیه‌سازی گردید. البته قابل ذکر است که به دلیل وجود تأخیر در خروجی‌های حسگرهای مغناطیسی نسبت به  $Z_p$ ، ۳ گام آینده از حسگرهای مغناطیسی مورد نیاز است که برای حل این مشکل از مدل پیش‌بین برای محاسبه خروجی حسگرها در زمان آینده استفاده شد. برای تهیه مدل پیش‌بین برای محاسبه خروجی حسگرهای مغناطیسی از شبکه تک لایه MLP با آموزش به روش LM بهره گرفته شد. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های تجربی و نتایج مدل نشان‌دهنده اعتبار خوبی از مدل شبیه‌ساز است.

در ادامه بین نتایج به دست آمده از مدل پیش‌بین جابجایی عمودی پلاسما در این پروژه با نتایج حاصل از [۱۹] مقایسه‌ای انجام گردید. با توجه به میانگین مجموع مربعات خطای تست مدل پیش‌بین بدست آمده در این پروژه که  $14 \times 10^{-6}$  (برای ۲۷۰ نمونه) می‌باشد نسبت به میانگین مجموع مربعات خطای آزمایش مدل پیش‌بین بدست آمده از [۱۹] که  $57 \times 10^{-5}$  (برای ۱۵۹ نمونه) بوده است، مدل پیش‌بین جابجایی عمودی بهبود بسیاری داشته است.

همچنین در آخر مقایسه‌ای بین نتایج مدل شبیه‌ساز جابجایی عمودی پلاسما در این پروژه و [۴] انجام گردید. خطای آزمایش برای مدل بدست آمده از این پروژه برابر  $13 \times 10^{-4}$  (برای ۲۷۰ نمونه) بدست آمد که نسبت به مدل بدست آمده با استفاده از حسگرهای حلقه زینی در [۱۹] که خطای تست در شات انتخاب شده برای تست، در مدل بهینه آن  $59 \times 10^{-4}$  (نمونه ۱۴۰) بود، بهبود چشمگیری داشته است. بنابراین استفاده از حسگرهای مغناطیسی برای مدل‌سازی جابجایی عمودی پلاسما موجب بدست آوردن مدل مناسب‌تری از سیستم می‌گردد.

## فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری:

با توجه به اهمیت مسئله پایدارسازی مکان پلاسما، در این پروژه سعی بر آن بود که با داشتن اطلاعات فنی و تهیه داده‌های عملی از سیستم توکامک دماوند، با کمک روش‌های شناسایی سیستم توسط شبکه عصبی، مدل جابجایی عمودی پلاسما بدست آید. بدلیل روسی بودن کل مجموعه توکامک دماوند و عدم وجود نقشه‌ها و مدارهای مربوطه و مشخص نبودن معادلات کامل سیستم حلقه بسته، برای شناسایی مدل مکان پلاسما ضروری بود در ابتدا ساختار و توابع سیستم موجود از لحاظ فیزیکی و الکترونیکی مورد بررسی قرار گیرد و محدودیت‌های سیستم شناسایی گردند.

سیستم حلقه بسته تاکنون بر اساس کنترل شار میدان مغناطیسی ( $\Psi_z$ )، حاصلضرب جریان پلاسما در مکان پلاسما) اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای حلقه زینی، عمل می‌کرد که برای افزایش دقت و کنترل دقیق موقعیت عمودی پلاسما، برای اولین بار موقعیت دقیق پلاسما با تقسیم شار میدان مغناطیسی بر جریان پلاسما حاصل گردید و به طور مستقیم موقعیت عمودی پلاسما کنترل شد. برای اینکه بتوان این کنترل را انجام داد مدار مربوط به تولید سیگنال مکان عمودی پلاسما ( $Z_p$ ) طراحی و در ادامه مدار تقویت‌کننده سیگنال PRBS ورودی مرجع، مدار کنترل‌کننده PD، تنظیمات آن و تقسیم‌کننده بیان شده به طور متمرکز در یک برد الکترونیکی طراحی و ساخته شد.

برای تحلیل میدان‌های قطبی به منظور محاسبه مکان پلاسما و شناختن عوامل فیزیکی مؤثر برای تهیه مدل مناسب سیستم، باید محل دقیق حسگرها مشخص باشد. به دلیل اهمیت این موضوع، صحت نقشه مکان قرارگیری حسگرهای مغناطیسی که توسط روس‌ها ارائه شده بود بررسی گردید که طی آن مشخص شد نقشه موجود درست نبوده و با اندازه‌گیری‌های انجام

شده، نقشه صحیح تهیه شد. سپس برای تحلیل میدان‌های قطبی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مغناطیسی، باید ضریب کالیبره حسگرها محاسبه می‌شد که با طراحی و انجام آزمایشی ضریب کالیبره حسگرهای مغناطیسی تعیین گردید. البته قابل ذکر است که این کارها باعث ارتقاء کیفی سیستم کنترل موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند شده است.

در ادامه به منظور رسیدن به مدل دینامیکی جابجایی عمودی پلاسما، از تکنیک شناسایی سیستم‌های دینامیکی غیرخطی، با ابزار شبکه عصبی استفاده شد. به این منظور، پایگاه داده‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌ها در شرایط مختلفی از آزمایش بر روی توکامک تشکیل و با طراحی و انجام آزمایش‌های لازم به تعداد ۵۰ شات در حالت بدون کنترل (حلقه باز) و به تعداد ۱۰۰ شات در حالت کنترل‌شده (حلقه بسته)، در پایگاه داده ذخیره شد.

یکی از پیچیدگی‌های این پروژه در هر دو مرحله آزمایش عملی و شبیه‌سازی مدل دینامیکی دستگاه، به محدودیت زمانی در محصورسازی پلاسمای محفظه برمی‌گشت. به همین دلیل، در مدت زمان حضور پلاسما (۲۰ms)، امکان اعمال کامل سیگنال PRBS به عنوان ورودی مکان مطلوب وجود نداشت و مجبور به اعمال قسمتی از آن در هر آزمایش بودیم. با توجه به این نکته، باید کلیه شرایط آزمایش در هر شات یکسان باشد تا با ترکیب آن‌ها، سیگنال کاملی از PRBS داشته باشیم. ولی در نقاط ترکیب آن‌ها به دلیل تغییر شرایط اولیه ورودی‌های سیستم، میزان خطا بیشتر می‌شد.

در شناسایی مدل دینامیکی جابجایی پلاسما دو مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز غیرخطی ارائه گردید. مدل پیش‌بین با استفاده از شبکه عصبی MLP تک لایه، با ساختار NARX و آموزش به روش LM تهیه شد که نتایج حاصل از مقایسه داده‌های تجربی و نتایج مدل نشان‌دهنده اعتبار خوبی از مدل بود.



پس از آن مدل شبیه‌ساز با استفاده از شبکه تک لایه MLP، با ساختار NOE و آموزش به روش LM بدست آمد که با مقایسه نتایج حاصل از مدل و داده‌های تجربی این نتیجه حاصل شد که مدل خوب عمل کرده است. در انتها نتایج حاصل از مدل‌سازی در این پروژه و کارهای قبلی انجام شده در این زمینه نشان‌گر بهبود مدل‌سازی بود.

## ۶ ۶ پیشنهادات

با اجرای این پروژه، امکان جابجایی کنترل‌پذیر مکان عمودی پلاسما برای مطالعات و پژوهش‌های آینده فیزیک پلاسما در زمان تخلیه و مکان خاصی از محفظه به وجود آمده است. برای بهبود سیستم کنترل مکان پلاسما پیشنهاد می‌شود که در پروژه‌های آتی کنترل‌کننده عصبی برای مدل شبیه‌ساز طراحی گردد و در ادامه سیستم حلقه بسته به صورت سیمولاتوری اجرا و اعتبار سنجی شده و در نهایت بر روی دستگاه پیاده‌سازی گردد. اجرا و پیاده‌سازی آن، می‌تواند مقدمه‌ای برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های تطبیقی هوشمند در طرح‌های آتی توکامک باشد و مسیری روشن برای پژوهش‌های گداخت هسته‌ای کشور فراهم می‌آورد.

با اجرای این پروژه امکان جابجایی کنترل‌پذیر عمودی پلاسما در مدت زمان تخلیه الکتریکی و مکان خاصی از چنبره بوجود آمده است. امید است با انجام این پروژه بستر لازم جهت مطالعات و پژوهش‌های آینده برای محققین هسته‌ای کشورمان بوجود آمده باشد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد کلیه پروژه‌ها و تحقیقات در این مورد با جدیت تمام انجام گیرد تا در آینده‌ای نزدیک شاهد پیشرفت روزافزون کشور عزیزمان ایران باشیم.

## فهرست مراجع

- [۱] گاری مک کراکن، پیتر استات، ۱۳۸۶ "گداخت، انرژی کیهان" مترجمین: حسن غفوری فرد، رضا امراللهی، شروین گودرزی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
- [۲] مقصودی، م، (۱۳۸۸)، پایان نامه کارشناسی ارشد "بررسی و اندازه گیری سرعت چرخش پلاسمای توکامک با ماخ پروب"، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد
- [۳] روزانه پفالتسنر، ۱۳۸۸ "مقدمه ای بر گداخت به روش محصورسازی لختی"، مترجمین: اردوان کوهی، بابک خدادوست، ناشر: پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای
- [۴] دکتر سید مسعود مقدس تفرشی، ۱۳۸۴ "منابع تولید انرژی الکتریکی در قرن بیست و یکم"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [5] B.B.Kadomtsev, F.S.Troyon, M.L Watkins, (1990) "Tokamaks" *Nuc. Fusion*. Vol.30 No.9.
- [6] J.Wesson and D.J.Ward, (1990) "Negative voltage spike in tokamak disruptions" *Nucl Fusion* 30 No.6 1011.
- [7] Kurchatof Institute of Atomic Energy, (1994) "Tokamak Damavand AEOI" Moscow,
- [8] Ogata, Katsuhiko, (1994) "Discrete Time Control Systems", Translated by: P. Jabadar & Khaki-Sedigh,
- [9] M.L.Walker, D.A.Humphreys, J.A.Leuer, J.R.Ferron, (2000) "Initial Implementation of a Multivariable Plasma Shape and Position Controller on the DIII-D Tokamak" *General Atomics*, P.O. Box 85608, San Diego, California 92186-5608.
- [10] P.Vyas, R.Albanese, G.Ambrosino, M.Ariola, J.B.Lister, F.Villone, J.P.Wainwright, (1998) "Plasma Modelling for Position and Shape Control in TCV" *Symposium on Fusion Technology*, vol.1.
- [11] A.J.Wootton, (1979) "Measurements of plasma shape in a tokamak" *J.of.Nucl. Fusion* 19 987
- [12] Lei chen, Qingchu zhao, Yubao zhu, Zishen fang. (1997), "Measurements of plasma position on HT-7 tokamak" Elsevier. *Fusion Engineering and Design* 34-35, 721-724
- [13] Jordan Edwin Morelli, (2003), for the Degree of Doctor of Philosophy "Plasma Posituon Control in the STOR-M Tokamak a Fuzzy Logic Approach, A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements", Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon
- [14] Jordan E. Morelli, Akira Hirose, and Hugh C. Wood, (2005) "Fuzzy-Logic-Based Plasma Position Controller for STOR-M" *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, VOL. 13, NO. 2.
- [15] V.N.Dokuka, V.K.Gusev, (2004) "Simulation of Vertical Plasma Position Control System of GLOBUS-M Tokamak in the frame of Simulink DINA Concept", *31st EPS Conference on Plasma Phys. ECA* Vol.28G, P-1.180.
- [16] C. M. Bishop et al. (1993) *Proceedings of the 17th International Symposium on Fusion Technology*, Rome, Italy.
- [17] Parag Vyas. (1996), "Plasma Vertical Position Control in the COMPASS-D Tokamak" Department of Engineering Science University of Oxford OX1 3PJ
- [18] E Coccoresse, C. Morabito, and R. Martone. (1994), "Identification of non-circular plasma equilibria using a neural network approach", *Nucl. Fusion* Vol 34, No10
- [۱۹] رسولی، ح، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد "شناسایی مدل غیرخطی عصبی مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند و طراحی کنترل کننده غیرخطی عصبی"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[۲۰] طلوعی، ح، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "شناسایی و کنترل حرکت افقی پلازما در سیستم D-T"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[۲۱] دکتر مصطفی علی شیرین پور و دکتر محمود مصلحی فرد، ۱۳۷۳ "گذاخت هسته‌ای" انتشارات سازمان انرژی اتمی

[22] R.R. Khayrutdiov, et,al ,(1993) " Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-variable Technique" *Journal of Computational Physics*, vol.109 No.2,Dec

[23] Luigi Scibile,(1997) ,Ph.D. thesis, "Non-linear Control of the Plasma Vertical Position in a Tokamak", University of Oxford

[۲۴] رسولی ح، فاتحی ع، رسولی چ، فرهد، موسوی نیا، طراحی مدل شبیه ساز مکان عمودی پلاسمای توکامک دماوند بر اساس داده‌های تجربی سیستم

[۲۵] رسولی ح، فاتحی ع، رسولی چ، موسوی نیا، طراحی و شبیه سازی کنترل کننده عصبی مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند

[26] D.W. Swain,G.H. Neilson,(1982) "An efficient technique for magnetic analysis of non-circular, high-beta tokamak equilibria" *J.of. Nucl. Fusion* 22 1015

[27] Bortnikof A.V.et al,(1990) "Inverter of Voltage of Plasma Position automatic control system for the TVD Tokamak", IAE-5068/7, Moscow

[28] Mikhael M. (2008) "Real-time Digital Control of Plasma Position and Shape on the TEXTOR Tokamak" *vol.33,publisher Forschungszentrum, Zentralbibliothek*

[29] Ljung, Lennart, (1987) "System Identification Theory for the User" ,P T R Prentice Hall.Inc

[30] Olive .Nelles. (2002), "Nonlinear System Identification", Springer,

[31] A. Greco, N. Mammone, F.C. Morabito, and M.Versaci. (2005) "Artificial Neural Networks for Classifying Magnetic Measurements in Tokamak Reactors", *PROCEEDINGS OF WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY VOLUME 7 ISSN 1307-6884.*

[32] E. Coccoresse, C. Morabito, and R. Martone.( 1994), *Nucl. Fusion* 34, 1349,

[33] R. Yoshino, J. K. Koga, and T. Takeda. (1996), *Fusion Technol.* 30, 237,

[34] R. Albanese, E. Coccoresse, O. Gruber, R. Martone, P. McCarthy, and F.

C. Morabito. (1996), *Fusion Technol.* 30, 219,

[35] Yong-Su Na, Young-Mu Jeon, S. H. Hong, and Y. S. Hwang. (2001) "Real-time extraction of plasma equilibrium parameters in KSTAR tokamak using statistical methods", *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, VOLUME 72, NUMBER 2.*

[36] K.S.Narendra and K.Parthasarathy. (1990), "Identification and Control Dynamical Systems Using Neural Network", *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol.1,pp4\_24.

[37] Yong-Su Na, Young-Mu Jeon, S. H. Hong, and Y. S. Hwang. (2001), "Real-time extraction of plasma equilibrium parameters in KSTAR tokamak using statistical methods", *Review of Scientific Instruments, Volume72, Number2.*

[38] Young-Mu Jeon, Yong-Su, Myun-Rak kim and Y.S.Hwang. (2001), "Newly developed double neural network concept for reliable fast plasma position control", *Review of Scientific instruments, V.72.No.1.*

[۳۹] رسولی، حسین؛ فاتحی، علیرضا، (۱۳۸۶) "طراحی و شبیه‌سازی مدل پیش‌بین مکان عمودی پلازما در توکامک دماوند با استفاده از شبکه‌های مختلف عصبی" کنفرانس هسته‌ای، دانشگاه یزد-ایران.

[40] Simon Haykin. (1999), "Neural Network" A comprehension, Prentice Hall.

[41] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Beale. (1996), "Neural Network Design" PWS publishing company,

## Abstract

Vertical movement of Plasma column in Tokamak is substantially unstable and the instability causes its strike against chamber's wall and disruption. So control system can provide necessary power to control Plasma by creating variable magnetic fields. Control system of Plasma vertical position in Damavand tokomak, until now, worked according to measured magnetic field flux by saddle loop sensors, which in this thesis, in order to increase accuracy, the real Plasma vertical position and directly plasma vertical position is examined. If we want to start up the control system, related circuit for creating plasma vertical position signal ( $Z_p$ ), signal supporter circuit (PRBS), main reference entrance and controller circuit PD, are designed and built in an electronic board integrally

In order to analyze polar fields to measure plasma position and recognition of effective physical factors for producing suitable model of system vertical position, the exact position of sensors is defined. So, accuracy of position of magnetic sensors which has been presented by Russian, examined and it was cleared that it was not accurate and the correct one was prepared. After that caliber coefficient of sensors would be defined to analyze polar fields measured by magnetic sensors and it was defined by designing a caliber index experiment.

For the purpose of analyze and design control systems, it's necessary to have a mathematical model of the device that can describe system dynamic as much as possible. In order to prepare dynamic model of plasma vertical position in tokomak, we tried to use experimental data and recognition system technique and designed predictor model and nonlinear simulator for plasma vertical position. In this case, necessary experiments designed and performed. The method and condition of experimental data has been presented and by creating a data base, identification possibility and different modeling are provided for future researches. One of the most important problems in identifying this device is impossibility of total and one time applying signal PRBS, which is as a result of plasma resistance time and hardware limitation in starting up control current. Because of this some part of the signal is applied.

predictor model was prepared by means of one layer neural network MLP, with NARX construction and training by LM that output results of experimental data and model presented a good credit. After that, a simulator model is prepared by means of one layer neural network MLP, with NOE construction and training by LM that output results and experimental data shows a good credit for the model. Finally, output results of modeling was compared with past projects in this case, and presented a progress in modeling process.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Vertical Position Identification of Plasma in Damavand Tokamak by  
means of Magnetic sensors as Measuring Device

Mehri kheyri fard

Supervisors:

Heydar toosian shandiz

Asghar sadighzadeh

Advisor:

Hossein Rasouli

February2012