

**دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی**

**دانشکده مهندسی برق**

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق-گرایش کنترل

**عنوان**

**شناسایی و کنترل حرکت افقی پلاسما در سیستم D-T**

**نگارش**

حامد طلوعی

**اساتید راهنما**

دکتر علیرضا فاتحی

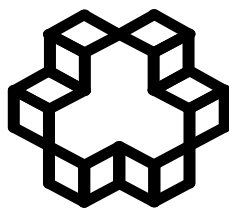
دکتر اردوان کوهی

**استاد مشاور**

دکتر مهدی علیاری شوره‌دلی

مرداد ماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

دانشکده برق

### تأییدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت

عنوان: شناسائی و کنترل حرکت افقی پلاسما در سیستم D-T

توسط آقای حامد طلوعی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی

ارشد در رشته: مهندسی برق گرایش: کنترل با نمره: ..... مورد تأیید قرار می دهند.

۱	استاد راهنمای اول	آقای دکتر علیرضا فاتحی	امضاء
۲	استاد راهنمای دوم	آقای دکتر اردوان کوهی	امضاء
۳	استاد مشاور	آقای دکتر مهدی علیاری شوره دلی	امضاء
۴	استاد ارزیاب داخلی	آقای دکتر محمد تشنه لب	امضاء
۵	استاد ارزیاب خارجی	آقای دکتر حمید رضا مومنی	امضاء
۶	نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر	امضاء

## اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه:

### شناسایی و کنترل حرکت افقی پلاسما در سیستم D-T

اینجانب حامد طلوعی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده است و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. همچنین گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ‌گونه مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ‌جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه الگوی مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

حامد طلوعی

شهریور ماه ۱۳۹۰

## حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی‌برداری به صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه‌ی دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## سپاسگزاری 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 نشسته است. پس به پاس این همه بزرگواری، تلاش و رنج، بر خود می دانم تا:

از شفقت، کرامت و راهنماییهای ارزنده استاد راهنمای فرزانه و شایستهام جناب آقای دکتر علیرضا فاتحی همچنین استاد مشاور عزیزم جناب آقای دکتر مهدی علیاری در این راه بی پایان با تمام وجود سپاسگزاری نمایم و از خداوند بزرگ پاداش دانشمندان دیندار را برای ایشان خواستارم.

از شکیبایی، خویشتنداری، بزرگی و محبتهای خانواده بزرگوارم به ویژه پدر مهربان و مادر فداکارم در این راه بس طولانی از ژرفای وجود قدردانی نمایم.

در گام به گام این پایان نامه، از بررسی، تحلیل و یاری علمی دوستان شفیق و صاحب کرامتم، جناب آقایان مهندس چاپار رسولی و مهندس حسین رسولی بهره‌های وصف ناشدنی برده‌ام 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 شائبه‌ی این عزیزان از ژرفای جان قدردانی می‌نمایم.

از همکاری، همدلی و یاری مشفقانه دوستان و همکارانم بویژه آقایان، مهندس محسن معبودی، پیمان باقری، حامد زمانیان، محمد منشوری، سیاوش فحیمی درخشان، مهرداد شربیانی، حسن حبیبی که حقیقتاً در مدت انجام پروژه شکیبایی ورزیدند و این کمترین را با بزرگترین خویش کامروا نمودند، صمیمانه و فروتنانه قدردانی می‌کنم.

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 سیاسان روزگار عنایت فرماید تا امانتداری نیکاندیش باشم.

با احترام و سپاس

حامد طلوعی

شهریور ماه ۱۳۹۰

## چکیده:

از دیرباز آرزوی بشر دستیابی به منبعی از انرژی بوده که علاوه بر آنکه بتواند مدت مدیدی از آن استفاده کند تولید پسماندهای خطرناک نیز در پی نداشته باشد. اکنون در هزاره سوم میلادی این آرزوی به ظاهر دست نیافتنی کم کم به واقعیت می پیوندد. اکنون بشر خود را آماده می کند تا با ساخت اولین راکتور هسته‌ای آرزوی نیاکان خود را تحقق بخشد. سوختی پاک و ارزان به نام هیدروژن با انرژی تولیدی فوق‌العاده زیاد و پسماندی بسیار پاک به نام هلیوم.

سالهاست که دانشمندان واکنشی را که در خورشید و ستارگان رخ داده و در آن انرژی تولید می کند کشف کرده‌اند. این واکنش عبارتست از برخورد هسته‌های اتم هیدروژن و تولید یک هسته اتم هلیوم. یک تعریف پایه‌ای و ساده از همجوشی هسته‌ای عبارتست از ترکیب هسته‌های چند اتم سبکتر و تشکیل یک هسته سنگین تر که با آزاد شدن انرژی همراه است.

همان طور که می دانیم هسته از ذرات ریزی تشکیل شده است که پروتون و نوترون جز لاینفک آن هستند. نوترون بدون بار و پروتون دارای بار مثبت است که سایر بارهای مثبت را به شدت از خود می راند. حال سوال اساسی که مطرح می شود آن است که اگر پروتون‌ها یکدیگر را دفع می کنند چگونه می توان آنها را در همجوشی هسته‌ای شرکت داد؟ راه حل اساسی آن است که به این پروتون‌ها آنقدر انرژی بدهیم که انرژی جنبشی آنها بیشتر از نیروی دافعه کولنی آنها شود و پروتون‌ها بتوانند به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شوند. اما برای این کار چیزی حدود ۱۰۰ میلیون درجه سانتی‌گراد انرژی لازم است که هیچ محیط مادی توان مقاومت در برابر چنین انرژی را ندارد. یکی از راه‌های حل این مشکل محصورسازی مغناطیسی است. توکامک دستگاه چنبره‌ای محصورسازی پلاسماست که در آن از میدان‌های مغناطیسی برای محصورسازی و کنترل پلاسمای گرم استفاده می گردد. توکامک دماوند یک مجموعه پژوهشی در زمینه گداخت هسته‌ای است که در آن پلاسمایی با جریان بیشینه ۴۰ کیلوآمپر در مدت زمان ۲۰ میلی ثانیه تولید می شود.

در این پروژه برای اولین بار موفق به کنترل جابجایی افقی پلاسما در توکامک دماوند در مسیر متغیر برنامه ریزی شده و در مدت زمان تخلیه الکتریکی شدیم. با بکارگیری این قابلیت پلاسما در محدوده زمانی گوناگون از یک تخلیه الکتریکی در مکان‌های خاصی از چنبره کنترل می شود. این کنترل امکان بررسی پارامترهای مختلف پلاسما را در شرایط مختلف زمانی و مکانی از یک تخلیه مهیا می کند.

برای شناسایی مدل حلقه بسته کنترل مکان افقی پلاسما، ابتدا پس از انجام آزمایشات لازم معادلات مدارات راه‌انداز جریان کنترلی در پیچ‌ها به طور کامل تشریح گردید. سپس به بررسی روابط حاکم بر پلاسما پرداختیم. به دلیل پیچیدگی روابط حاکم بر فیزیک پلاسما امکان مدل‌سازی فیزیکی پلاسما وجود ندارد، به همین منظور با استفاده از تکنیک شناسایی سیستم‌ها به مدل‌سازی دستگاه موجود پرداختیم. یکی از مشکلات موجود در شناسایی این دستگاه عدم امکان اعمال کامل و یکباره سیگنال PRBS بوده که به علت کوتاه بودن زمان ماندگاری پلاسما و محدودیت سخت‌افزاری در راه‌انداز جریان کنترلی می-باشد. به همین دلیل در هر آزمایش بخشی از این سیگنال اعمال گردیده است.

در این پژوهش برای مدل‌سازی دستگاه از دو مدل پیش‌بین با ساختار NARX و مدل شبیه ساز با ساختار NOE بر پایه شبکه عصبی MLP استفاده گردیده است. در نهایت براساس مدل شبیه‌ساز بدست آمده کنترل کننده غیر خطی عصبی بر پایه شبکه عصبی MLP برای جایگزینی با کنترل کننده خطی PD طراحی و ارزیابی شده است.

## فهرست مطالب

۲	مقدمه
۶	فصل اول
۶	مقدمه‌ای بر گداخت هسته‌ای و روش‌های محصورسازی پلاسما
۷	۱-۱- انرژی گداخت هسته‌ای
۸	۲-۱- پلاسما و واکنش گداخت هسته‌ای
۱۰	۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی پلاسما
۱۱	۴-۱- روش‌های محصورسازی پلاسما
۱۲	۵-۱- محصورسازی پلاسما در توکامک
۱۲	۶-۱- توکامک
۱۴	۷-۱- توکامک دماوند
۱۸	فصل دوم
۱۸	سیستم کنترل مکان افقی پلاسما در توکامک دماوند
۱۹	۱-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲- سیستم کنترل حلقه باز جابجایی افقی پلاسما
۲۰	۱-۲-۲- کنترل‌کننده غیرفعال
۲۱	۲-۲-۲- کنترل‌کننده حلقه باز برنامه‌ریزی شده
۲۲	۳-۲- سیستم کنترل حلقه بسته جابجایی افقی پلاسما
۲۲	۱-۳-۲- ساختار سیستم کنترل حلقه بسته مکان افقی پلاسما در توکامک دماوند
۲۳	۲-۳-۲- روش‌های اندازه‌گیری مکان پلاسما در توکامک
۲۸	۳-۳-۲- ساختار کنترل‌کننده خطی PD
۲۸	۴-۳-۲- مدارات کنترل‌کننده محرک و مدار پل راه‌انداز جریان کنترلی
۳۲	۵-۳-۲- تغییر و راه‌اندازی مدارات سیستم جهت تولید سیگنال PRBS
۳۴	فصل سوم
۳۴	شناسایی جابجایی مکان افقی پلاسما
۳۵	۱-۳- مقدمه
۳۵	۲-۳- روش‌های مختلف شناسایی یک فرایند



۳۵	۳-۲-۱- شناسایی به صورت روی خط
۳۶	۳-۲-۲- شناسایی به صورت خارج خط
۳۶	۳-۳- دیدگاه‌های مختلف در مورد شناسایی حلقه بسته
۳۶	۳-۳-۱- روش غیرمستقیم
۳۶	۳-۳-۲- روش مستقیم
۳۷	۳-۴- مراحل شناسایی یک فرایند
۳۷	۳-۴-۱- طراحی و انجام آزمایش
۴۸	۳-۴-۲- پردازش اولیه داده‌ها
۵۳	۳-۴-۳- انتخاب ساختار مدل
۵۴	۳-۴-۴- تخمین پارامترها
۵۴	۳-۴-۵- تعیین اعتبار مدل
۵۴	۳-۵- مدل پیش‌بین مکان افقی پلاسما در توکامک
۶۰	۳-۵-۱- ساختار مدل پیش‌بین مکان افقی پلاسما در توکامک
۶۳	۳-۵-۲- تخمین تأخیر ورودی‌های شبکه
۶۳	۳-۵-۳- تعیین دینامیک‌های ورودی شبکه
۶۴	۳-۵-۴- انتخاب شات‌های مناسب و ترکیب آن‌ها برای آموزش شبکه
۶۶	۳-۵-۵- نتایج مدل پیش‌بین جابجایی افقی پلاسما در حالت حلقه بسته
۷۷	۳-۶- مدل شبیه‌ساز حرکت افقی پلاسما در توکامک
۷۷	۳-۶-۱- ساختار مدل شبیه‌ساز جابجایی افقی پلاسما
۷۸	۳-۶-۲- شرایط لازم برای آموزش و اعتبارسنجی مدل شبیه‌ساز
۷۹	۳-۶-۳- نتایج مدل شبیه‌ساز

## فصل چهارم

۸۲	طراحی کنترل‌کننده غیر خطی عصبی برای مکان افقی پلاسما
۸۳	۴-۱- مقدمه
۸۳	۴-۲- شبیه‌سازی مدارات راه‌انداز جریان کنترلی

---

۸۹	۱-۲-۴- تحلیل عملکرد سیمولاتور با مدار محرک مدل شده
۹۲	۳-۴- طراحی کنترل کننده غیرخطی بر پایه شبکه عصبی
۹۳	۱-۳-۴- شناسایی کنترل کننده PD توسط شبکه عصبی
۹۵	۲-۳-۴- نتایج کنترل سیستم حلقه بسته با کنترل کننده عصبی
۱۰۰	<b>نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۱۰۳	<b>مراجع</b>
۱۰۵	<b>پیوست ۱</b>
۱۰۶	<b>پیوست ۲</b>

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): واکنش هسته‌ای دوتریوم و تریتیوم و نیروی دافعه کولنی بین آنها ۹
- شکل (۲-۱): حالت‌های چهارگانه ماده ۱۰
- شکل (۳-۱): شماتیکی از سیستم توکامک برای بررسی عملکرد آن ۱۳
- شکل (۴-۱): نحوه و حصورسازی پلازما توسط میدان‌های قطبی و چنبره‌ای ۱۴
- شکل (۵-۱): نمای کلی از توکامک دماوند ۱۵
- شکل (۶-۱): سطح مقطع توکامک دماوند ۱۵
- شکل (۱-۲): شمای کلی از حلقه‌های کنترل غیرفعال ۲۰
- شکل (۲-۲): نحوه عمل کردن حلقه‌های کنترلی غیرفعال ۲۱
- شکل (۳-۲): بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته کنترل مکان افقی پلازما در توکامک دماوند ۲۲
- شکل (۴-۲): کنترل افقی پلازما با استفاده از پیچ‌های کنترلی خارجی ۲۳
- شکل (۵-۲): نمایش جابجایی افقی و عمودی پلازما در توکامک با سطح مقطع D شکل ۲۴
- شکل (۶-۲): نحوه قرار گرفتن حلقه‌های زینی در توکامک دماوند ۲۴
- شکل (۷-۲): مدار مربوط به تقسیم‌کننده به منظور محاسبه مکان افقی پلازما ۲۵
- شکل (۸-۲): نحوه قرار گرفتن پروب‌های مغناطیسی در توکامک STOR-M ۲۶
- شکل (۹-۲): نحوه قرار گرفتن پروب‌های مغناطیسی در توکامک دماوند ۲۷
- شکل (۱۰-۲): بلوک دیاگرام مربوط به مدارات محافظ و کنترل مدار پل ۲۹
- شکل (۱۱-۲): مدار پل راه‌انداز جریان کنترلی ۳۰
- شکل (۱۲-۲): مدار خلاصه شده راه‌انداز جریان کنترلی در توکامک دماوند ۳۱
- شکل (۱-۳): بلوک دیاگرام مربوط به نحوه شناسایی روی خط ۳۶
- شکل (۲-۳): بلوک دیاگرام مربوط به شناسایی به روش مستقیم و غیرمستقیم ۳۷
- شکل (۳-۳): بلوک دیاگرام مربوط به سیستم حلقه باز مکان افقی پلازما ۳۸
- شکل (۴-۳): بلوک دیاگرام مربوط به سیستم حلقه بسته مکان افقی پلازما ۳۸
- شکل (۵-۳): نمودار جریان پلازما ( $I_p$ )، حاصلضرب مکان افقی پلازما در جریان پلازما ( $\psi_R$ ) مربوط به شات ۳ ۳۹
- شکل (۶-۳): نمودار جریان پلازما ( $I_p$ )، حاصلضرب مکان افقی پلازما در جریان پلازما ( $\psi_R$ ) مربوط به شات ۴ ۳۹

- شکل (۷-۳): نمودار جریان پلاسما ( $I_p$ )، حاصلضرب مکان افقی پلاسما در جریان پلاسما ( $\psi_R$ ) مربوط به شات ۵ ۴۰
- شکل (۸-۳): نمودار جریان پلاسما ( $I_p$ )، حاصلضرب مکان افقی پلاسما در جریان پلاسما ( $\psi_R$ ) مربوط به شات ۶ ۴۰
- شکل (۹-۳): نمودار جریان پلاسما ( $I_p$ )، حاصلضرب مکان افقی پلاسما در جریان پلاسما ( $\psi_R$ ) مربوط به شات ۹ ۴۱
- شکل (۱۰-۳): نمودار جریان پلاسما ( $I_p$ )، حاصلضرب مکان افقی پلاسما در جریان پلاسما ( $\psi_R$ ) مربوط به شات ۱۰ ۴۱
- شکل (۱۱-۳): نمودار جریان پلاسما ( $I_p$ )، خروجی سنسور اول ( $\psi_R$ ) و خروجی سنسور دوم ( $\bar{\psi}_R$ ) به ترتیب در کانال‌های ۳ و ۲ ۴۲
- شکل (۱۲-۳): داده‌های مربوط به شات ۱ در حالت حلقه بسته ۴۴
- شکل (۱۳-۳): داده‌های مربوط به شات ۲ در حالت حلقه بسته ۴۵
- شکل (۱۴-۳): داده‌های مربوط به شات ۹ در حالت حلقه بسته ۴۶
- شکل (۱۵-۳): داده‌های مربوط به شات ۱۵ در حالت حلقه بسته ۴۷
- شکل (۱۶-۳): داده‌های مربوط به شات ۱ در حالت حلقه بسته پس از اعمال پیش‌پردازش ۴۹
- شکل (۱۷-۳): داده‌های مربوط به شات ۲ در حالت حلقه بسته پس از اعمال پیش‌پردازش ۵۰
- شکل (۱۸-۳): داده‌های مربوط به شات ۹ در حالت حلقه بسته پس از اعمال پیش‌پردازش ۵۱
- شکل (۱۹-۳): داده‌های مربوط به شات ۱۵ در حالت حلقه بسته پس از اعمال پیش‌پردازش ۵۲
- شکل (۲۰-۳): ساختار یک شبکه عصبی تک‌لایه ۵۳
- شکل (۲۱-۳): راهکار کنترل پیش‌بین ۵۵
- شکل (۲۲-۳): بلوک دیاگرام مدل NFIR ۵۶
- شکل (۲۳-۳): بلوک دیاگرام مدل NARMA ۵۷
- شکل (۲۴-۳): بلوک دیاگرام مدل NARX ۵۸
- شکل (۲۵-۳): بلوک دیاگرام مدل NARMAX ۵۹
- شکل (۲۶-۳): بلوک دیاگرام مدل NOE ۶۰
- شکل (۲۷-۳): بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترل مکان افقی پلاسما به همراه تهیه مدل پیش‌بین ۶۱
- شکل (۲۸-۳): ساختار NARX برای مدل پیش‌بین ۶۱
- شکل (۲۹-۳): مدل یک نرون در حالت کلی ۶۲
- شکل (۳۰-۳): نمونه‌ای از ترکیب شات‌ها برای تهیه مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز ۶۶

- شکل (۳-۳۱): منحنی تغییرات RMS خطای داده‌های آزمایش به ازای تغییرات نرون‌های لایه میانی برای زمان‌های نمونه-برداری ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکروثانیه  
۶۷
- شکل (۳-۳۲): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه‌برداری  $10\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۶۹
- شکل (۳-۳۳): شکل موج خطای داده‌های آزمایش و آموزش مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه-برداری  $10\mu s$   
۶۹
- شکل (۳-۳۴): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه‌برداری  $20\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۷۰
- شکل (۳-۳۵): شکل موج خطای داده‌های آزمایش و آموزش مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه-برداری  $20\mu s$   
۷۰
- شکل (۳-۳۶): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه‌برداری  $50\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۷۱
- شکل (۳-۳۷): شکل موج خطای داده‌های آزمایش و آموزش مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه-برداری  $50\mu s$   
۷۱
- شکل (۳-۳۸): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه‌برداری  $100\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۷۲
- شکل (۳-۳۹): شکل موج خطای داده‌های آزمایش و آموزش مدل پیش‌بین با بکارگیری روش گرادیان نزولی برای زمان نمونه-برداری  $100\mu s$   
۷۲
- شکل (۳-۴۰): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین با بکارگیری روش LM برای زمان نمونه‌برداری  $10\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۷۵
- شکل (۳-۴۱): خطای داده‌های آزمایش و آموزش مدل پیش‌بین با بکارگیری روش LM برای زمان نمونه‌برداری  $10\mu s$   
۷۵
- شکل (۳-۴۲): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل پیش‌بین با بکارگیری روش LM برای زمان نمونه‌برداری  $100\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۷۶
- شکل (۳-۴۳): خطای داده‌های آزمایش و آموزش مدل پیش‌بین با بکارگیری روش LM برای زمان نمونه‌برداری  $100\mu s$   
۷۶
- شکل (۳-۴۴): بلوک دیاگرام حلقه بسته کنترل مکان افقی پلاسما به همراه مدل شبیه‌ساز  
۷۷
- شکل (۳-۴۵): ساختار مدل شبیه‌ساز جابجایی افقی پلاسما  
۷۸
- شکل (۳-۴۶): مقایسه خروجی واقعی با خروجی مدل شبیه‌ساز با بکارگیری روش LM برای زمان نمونه‌برداری  $100\mu s$  برای شات‌های ۲۳ و ۲۴ (شات‌های آزمایش)  
۸۰
- شکل (۳-۴۷): شکل موج خطای داده‌های آزمایش مدل شبیه‌ساز با بکارگیری روش LM برای زمان نمونه‌برداری  $100\mu s$   
۸۰

- ۸۴ شکل (۱-۴): مدار راه‌انداز جریان کنترلی در توکامک
- ۸۵ شکل (۲-۴): مدار الکترونیکی تولیدکننده سیگنال‌های فرمان تریستورها
- ۸۶ شکل (۳-۴): مدار خلاصه شده راه‌انداز جریان کنترلی در توکامک دماوند
- ۸۷ شکل (۴-۴): جریان کنترلی واقعی و اندازه‌گیری شده برای ۵ شات
- ۸۸ شکل (۵-۴): جریان کنترلی واقعی و اندازه‌گیری شده برای ۶ شات
- ۸۸ شکل (۶-۴): جریان کنترلی واقعی و اندازه‌گیری شده برای ۱۵ شات
- ۸۹ شکل (۷-۴): جریان کنترلی واقعی و اندازه‌گیری شده برای ۲۴ شات
- شکل (۸-۴): بلوک دیاگرام حلقه بسته با جایگزینی سیمولاتور به جای دستگاه و مدل شبیه‌سازی شده محرک به جای مدار راه‌انداز
- ۹۰
- ۹۱ شکل (۹-۴): مقایسه خروجی  $I_p$  و  $I_{cr}$  با خروجی مدل‌های شبیه‌ساز آنها ( $\hat{I}_p$  و  $\hat{I}_{cr}$ ) برای ۶ شات
- ۹۱ شکل (۱۰-۴): مقایسه خروجی  $I_p$  و  $I_{cr}$  با خروجی مدل‌های شبیه‌ساز آنها ( $\hat{I}_p$  و  $\hat{I}_{cr}$ ) برای ۱۲ شات
- ۹۲ شکل (۱۱-۴): مقایسه خروجی  $I_p$  و  $I_{cr}$  با خروجی مدل‌های شبیه‌ساز آنها ( $\hat{I}_p$  و  $\hat{I}_{cr}$ ) برای ۱۵ شات
- ۹۳ شکل (۱۲-۴): بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته مکان افقی پلاسما با کنترل‌کننده عصبی
- ۹۴ شکل (۱۳-۴): بلوک دیاگرام شناساگر عصبی کنترل‌کننده PD
- ۹۴ شکل (۱۴-۴): سیگنال ورودی PRBS و خروجی کنترل‌کننده PD و خروجی سیمولاتور
- ۹۷ شکل (۱۵-۴): مقایسه عملکرد کنترل‌کننده عصبی با کنترل‌کننده PD دستگاه برای ۵ شات
- ۹۷ شکل (۱۶-۴): مقایسه عملکرد کنترل‌کننده عصبی با کنترل‌کننده PD دستگاه برای ۹ شات
- ۹۸ شکل (۱۷-۴): مقایسه عملکرد کنترل‌کننده عصبی با کنترل‌کننده PD دستگاه برای ۱۰ شات
- ۹۸ شکل (۱۸-۴): مقایسه عملکرد کنترل‌کننده عصبی با کنترل‌کننده PD دستگاه برای ۲۳ شات

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱): مشخصات و پارامترهای اصلی توکامک دماوند ۱۶
- جدول (۲-۱): میزان شارژ بانک‌های خازنی توکامک دماوند و تأخیر زمانی آن‌ها ۱۷
- جدول (۱-۳): مقادیر RMS خطای داده‌های آزمایش و آموزش پس از مشخص تعداد نرون و تعداد دفعات آموزش بهینه برای روش آموزش گرادیان نزولی ۶۸
- جدول (۲-۳): مقایسه نتایج ساختار سه مدل پیش‌بین با افق‌های پیش‌بین متفاوت ۷۳
- جدول (۳-۳): نتایج بدست آمده برای مدل پیش‌بین در شبکه MLP با روش آموزشی LM ۷۴
- جدول (۴-۳): بدست آمده برای مدل پیش‌بین در شبکه MLP با روش آموزشی CG ۷۴
- جدول (۵-۳): بدست آمده برای مدل شبیه‌ساز در شبکه MLP با روش آموزشی LM ۷۹
- جدول (۶-۳): نتایج شبیه‌سازی مکان با بکارگیری مدل‌های خطی برای زمان نمونه‌برداری  $100\mu s$  ۸۱
- جدول (۱-۴): مقایسه نتایج کنترل‌کننده PD با کنترل‌کننده عصبی ۹۹

مقدمه



## مقدمه

در فیزیک تعبیر رایج از انرژی، قابلیت انجام کار است و از طرف دیگر بشر برای تداوم زندگی و ارتقای سطح آن نیاز مداوم به انجام کار دارد و این یعنی آنکه نیاز بشر به انرژی اساسی‌ترین و مهم‌ترین نیاز مادی وی محسوب می‌شود. بشر برای فعالیت‌های حیاتی‌اش انرژی لازم را از تغذیه بدست می‌آورد و برای تحقق بخشیدن به تفکرات و مقاصد خلاقانه‌اش که نیاز به ایجاد تغییرات اساسی در طبیعت دارند به ماشین‌ها و کارخانجاتی متوسل می‌شود که با انوعی از انرژی کار می‌کنند. البته انواع انرژی این خاصیت را هم دارند که به همدیگر تبدیل پذیرند.

در حال حاضر، بشر حتی برای برآوردن نیازهای غذایی‌اش، تا حد بسیار زیادی به کشاورزی، ترابری و فرآوری مکانیزه که همگی مصرف بالای انرژی را طلب می‌کنند وابسته شده است. توسعه صنایع گوناگون دیگر نیز هر کدام به نوعی باعث افزایش نیاز بشر به انرژی گردیده‌اند. امروزه میزان مصرف انرژی به عنوان شاخصه‌ای معنا دار برای نمایش توسعه یافتگی تلقی می‌شود و از این رو است که عمده کشورها یافتن منابع انرژی را سرلوحه برنامه‌های اصلی توسعه و پیشرفت خود قرار داده‌اند. هرچند اتخاذ تدابیر هوشمندانه برای بهره برداری موثر و جلوگیری از مصرف مسرفانه انرژی نیز در جای خود نقش مهمی در سیاست کشورها ایفا می‌نماید.

تا بحال رویکرد انسان در مورد تولید انرژی مورد نیازش، استفاده از میراث بازمانده از گذشته بوده است. اما نکته اینجاست که این میراث چه سوخت‌های فسیلی باشد که طی میلیون‌ها سال در اعماق خاک بوجود آمده‌اند و چه اورانیومی باشد که میلیاردها سال پیش در تحولات ستاره‌ای بوجود آمده، نهایتاً تمام شدنی است.

در زمانی نه چندان دور ذخایر نفت، گاز و زغال‌سنگ همگی به اتمام می‌رسند، به‌علاوه آثار تخریب‌گرانه گلخانه‌ای و زیست محیطی ناشی از استفاده از این نوع انرژی‌ها هم‌اکنون پدیدار گردیده است. با توجه به کلیه جوانب، سایر منابع انرژی نظیر بادی و خورشیدی و غیره نیز در اندازه‌های لازم برای پاسخگویی به نیاز به سرعت روبه گسترش بشر نمی‌باشد. پس راه حل کدام است؟

چنین به نظر می‌رسد که به‌کارگیری انرژی حرارتی هسته‌ای از طریق ساخت راکتورهای گداخت بتواند راه حل اساسی مساله بحران انرژی آینده باشد. پدیده گداخت یا همجوشی در خورشید و ستارگان، عامل اصلی تولید انرژی است. در اینجا از این خاصیت مهم فیزیکی استفاده می‌شود که وقتی هسته‌های سبک (مثلاً هسته ایزوتوپ‌های هیدروژن) با هم ترکیب شوند، تولید انرژی می‌کنند که به صورت انرژی جنبشی و حرارت قابل استفاده خواهد بود. در حقیقت این انرژی نه تنها جوابگوی نیاز روزافزون بشر خواهد بود بلکه

در مقایسه با سوخت‌های دیگر مانند نفت، گاز، زغال‌سنگ 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) و حتی مسأله‌ای به نام حمل و نقل سوخت و دفن پسماندهای زیانبار هسته‌ای هم در مورد آن وجود نخواهد داشت.

البته ممکن است به برنامه ایجاد انرژی به‌وسیله گداخت این خرده را بگیرند که هنوز مسائل مربوط به استفاده از آن حل نشده است و اشکالات فراوانی در برابر عملی شدن آن موجود است. اما از سویی نیز می‌توان گفت با در نظر گرفتن اهمیت و توان نهفته در گداخت اگر در جستجوی تولید انرژی حاصل از آن نباشیم کم‌کاری غیر قابل جبرانی مرتکب شده‌ایم که از دید نسل‌های آینده نابخشودنی است.

همان‌طور که می‌دانیم حالت چهارم ماده پلاسما نامیده می‌شود که بیشتر جهان را فرا گرفته است. پلاسما فراوان‌ترین حالت ماده در جهان است. انرژی تابشی از خورشید و ستارگان که منشأ هسته‌ای دارد در اثر واکنش‌های هسته‌ای در آنها در محیط پلاسما بوجود می‌آید.

پیش‌بینی شده است که از روش‌های رایج شناخته شده که به گداخت هسته‌ای برای تولید انرژی منتهی می‌شود دو روش محصورسازی مغناطیسی (توکامک) و محصورسازی لختی (لیزری) بسیار امکان‌پذیرترند. برای روش محصورسازی مغناطیسی پروژه عظیم ایتر<sup>۱</sup> با همکاری چندین کشور صنعتی در حال انجام بوده و تا سال ۲۰۱۶ میلادی اولین پلاسما با قابلیت ماندگاری از انرژی آزاد شده در آن تولید خواهد شد. چندین سال دیگر نیاز است تا با استفاده از این راکتور به تحقیقات اولیه در زمینه نیروگاه‌های واقعی گداخت هسته‌ای دست پیدا کنیم. توکامک دستگاه چنبره‌ای محصورسازی پلاسماست که موفق‌ترین روش دستیابی به گداخت هسته‌ای از طریق محصورسازی مغناطیسی است. در این روش به منظور برقراری تعادل میان فشار پلاسما و نیروهای مغناطیسی از میدان قطبی که در اثر القای جریان خود پلاسما ایجاد شده است، نیز استفاده می‌شود. روش محصورسازی لختی از لیزرهای بسیار پرنرژی استفاده خواهد کرد. در حال حاضر دو پروژه بزرگ نیف<sup>۲</sup> در ایالات متحده آمریکا و دیگری لیزر مگاژول<sup>۳</sup> در فرانسه در حال انجام می‌باشد. [۱۸]

در مبحث تعادل توکامک دو مفهوم پایه وجود دارد. اول توازن داخلی میان فشار پلاسما و نیروهای حاصل از میدان مغناطیسی، دوم شکل و مکان پلاسما که بوسیله جریان سیم‌پیچ‌های خارجی و اعمال میدان، قابل کنترل است.

<sup>۱</sup> - ITER

<sup>۲</sup> - NIF

<sup>۳</sup> - LMJ

پس از مسأله تعادل پلاسما در توکامک مسأله بعدی کنترل مکان پلاسما در مدت زمان محصورسازی است. هدف آن است که مکان ستون پلاسما از مرکز محفظه کمترین جابجایی را داشته باشد و لازمه کنترل، آن است که پلاسما کمترین برخورد را با بدنه داشته باشد چرا که با کوچک‌ترین برخورد با بدنه، پلاسما از بین خواهد رفت. برای این منظور از پیچ‌های چهارقطبی در داخل چنبره به عنوان کنترل‌کننده غیرفعال و پیچ‌های قطبی خارجی در بیرون چنبره به عنوان کنترل‌کننده فعال استفاده می‌شود.

با توجه به شرایط و ویژگی‌های پلاسما، پلاسما از سویی تابع قوانین الکترومغناطیس است و از سویی دیگر از معادلات سیالی پیروی می‌کند، این امر سبب می‌شود مدل‌سازی فیزیکی پلاسما امری دشوار و پیچیده گردد.

به طور کلی در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی داشتن یک مدل ریاضی مناسب از دستگاه الزامی است. منظور از مدل ریاضی مناسب مدلی است که بتواند دینامیک سیستم را تا حد امکان به طور کامل توصیف کند.

اصولاً برای بدست آوردن یک مدل ریاضی از دستگاه دو روش وجود دارد. روش اول آن است که بر اساس قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم معادلات ریاضی سیستم را بدست آورده و بر پایه آن مدل مناسبی برای سیستم بدست آوریم. روش دوم آن است که با استفاده از تکنیک شناسایی و بر پایه داده‌های ورودی و خروجی سیستم و با در نظر گرفتن یک ساختار مناسب برای مدل، پارامترهای مجهول مدل را بدست آورده و بر پایه آن یک مدل ریاضی مناسب برای دستگاه بدست آوریم. اما در حالت کلی در بسیاری از موارد (همچون دینامیک حرکت و شکل پلاسما) به دلیل پیچیدگی بیش از حد فرایند نمی‌توان تنها بر مبنای قوانین فیزیکی یک مدل مناسب برای سیستم بدست آورد، از طرفی همیشه امکان انجام شناسایی نیز وجود ندارد. بنابراین در این‌گونه موارد لازم است برخی از پارامترهای مدل را به روش مدل‌سازی فیزیکی و برخی را به روش شناسایی بدست آوریم، از این‌رو برای بدست آوردن یک مدل مناسب در برخی از موارد ترکیب این دو روش ضروری به نظر می‌رسد. [۱۷]

دو نمونه مدل‌سازی فیزیکی موفق برای شکل و مکان پلاسما در توکامک‌های DIII-D [۱۵] و TCV [۱۶] بوده است.

از آنجا که شبکه‌های عصبی توانایی فوق‌العاده‌ای برای مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی دارند لذا در این پژوهش برای شناسایی فرایند از این شبکه‌ها استفاده نموده‌ایم. همچنین به دلیل پیچیده بودن فرایند، برخی از پارامترهای مدل (مدارات محرک دستگاه) به روش مدل‌سازی فیزیکی بدست آمده‌اند.

در این مجال موارد بحث شده در فصل‌های مختلف به صورت زیر خواهند بود:

در فصل اول مقدمه‌ای کوتاه بر گداخت‌هسته‌ای و پلاسما، روش‌های مختلف محصورسازی، مشخصات و مسائل فنی نمونه‌هایی از توکامک‌های مهم دنیا و در نهایت مشخصات و مسائل فنی توکامک دماوند ارائه می‌گردد.

در فصل دوم سیستم کنترل مکان افقی پلاسما در توکامک دماوند به طور کامل تشریح می‌گردد. همچنین در این فصل به بررسی محدودیت‌های موجود برای شناسایی دینامیک جابجایی افقی پلاسما نیز پرداخته می‌شود.

در فصل سوم ابتدا به بررسی مراحل شناسایی سیستم پرداخته، سپس دو مدل پیش‌بین و شبیه‌ساز برای سیستم طراحی می‌کنیم.

در فصل چهارم ابتدا به مدل‌سازی فیزیکی مدارات محرک پرداخته، سپس براساس مدل شبیه‌ساز بدست آمده به طراحی کنترل‌کننده غیرخطی عصبی برای دستگاه پرداخته و در پایان به مقایسه نتایج بدست آمده کنترل‌کننده عصبی و کنترل‌کننده خطی PD دستگاه می‌پردازیم.