



## طراحی کنترل کننده بهینه تطبیقی فازی-تناسبی انتگرالی مشتقی برای یک دیزل ژنراتور نمونه در شرایط تغییر بار

محمد حسین گوبانی<sup>۱</sup>، سلیمان نجفی بیرگانی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\* نویسنده مسئول: soleiman.najafi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

<https://doi.org/10.82385/jacms.2025.1220294>

### چکیده

در این مقاله، یک کنترل کننده تطبیقی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی<sup>۱</sup> بهینه شده با الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> برای بهبود پایداری فرکانس دیزل ژنراتور در شرایط تغییر بار ارائه شده است. کنترل کننده پیشنهادی با تنظیم تطبیقی ضرایب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی<sup>۳</sup> بر اساس خطا و مشتق خطا، عملکرد سیستم را در شرایط مختلف کاری بهینه می‌سازد. نتایج کمی به دست آمده نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با نوع کلاسیک، زمان نشست را از ۶/۳۴ تا ۲/۰۷ ثانیه (کاهش ۶۷٪) رسانده و فرجهش را از ۵/۵۵٪ به ۰/۱۶۶٪ (کاهش ۸۸٪) بهبود بخشیده است. همچنین تعداد نوسانات خروجی از ۴ نوسان به ۱ نوسان کاهش یافته و خطای ماندگار کاملاً حذف گردیده است. در آزمایش پاسخ به اغتشاش بار، سیستم با کنترل کننده پیشنهادی در زمان ۱/۳۷ ثانیه به حالت پایدار بازگشته و در سناریوی تعقیب نقطه مرجع، با فرجهش تنها ۱/۷۸٪ تغییرات را دنبال نموده است. بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک منجر به کاهش ۴۷ درصدی در زمان نشست و کاهش ۱۵ درصدی فرجهش در مقایسه با کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی بهینه نشده گردید. این یافته‌ها نشان می‌دهند که رویکرد پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود پایداری و کیفیت توان در دیزل ژنراتورها به‌ویژه در سیستم‌های قدرت مستقل به کار رود.

**کلمات کلیدی:** فازی تناسبی انتگرالی مشتقی، گاورنر، الگوریتم ژنتیک، دیزل ژنراتور، کنترل فرکانس.

### مقدمه

دیزل ژنراتورها به دلیل توانایی در تامین برق پایدار و مداوم، به عنوان منابع برق سیار، اضطراری یا میدانی، به طور گسترده در عملیات میدانی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو آنها به یکی از اجزای اصلی در عملیات صنعتی تبدیل شده‌اند که دلیل این توجه ویژه به آنها در زمینه تولید، بهره‌وری بالای مصرف سوخت نسبت به سایر موتورهای احتراقی می‌باشد. لی و همکاران [۱] با ارائه یک مدل موتور دیزل خطی شده محلی بر اساس نقشه گشتاور غیرخطی، نشان دادند که می‌توان پارامترهای کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی را به صورت سیستماتیک و بدون نیاز به روش سعی و خطا تنظیم کرد. این رویکرد امکان تحلیل پایداری سیستم در نقاط کار مختلف را فراهم می‌سازد. وی و همکاران [۲] در پیاده‌سازی عملی یک سیستم کنترل فازی بر روی دیزل ژنراتور کامینز ۲۵۰ کیلووات به این نتیجه رسیدند که کنترل کننده فازی با خطای حالت گذرای کمتر از ۰/۴٪ و خطای حالت ماندگار کمتر از ۰/۲٪، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های آنالوگ مرسوم دارد. این پژوهش موفقیت کنترل فازی در محیط عملیاتی را نشان می‌دهد. با افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و تمرکز بر صرفه‌جویی در مصرف سوخت، این موتورها اکنون با محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تری در زمینه انتشار آلاینده‌ها و استانداردهای مصرف سوخت مواجه هستند. برای حفظ عملکرد روان آنها، استفاده از کنترل کننده‌های دقیق سرعت به منظور مدیریت نوسانات اجتناب ناپذیر، ضروری است. یوان و همکاران [۳] با طراحی یک کنترل کننده گسسته ساختار متغیر لغزشی برای دیزل‌های دریایی نشان دادند که این روش در

<sup>۱</sup> Adaptive Fuzzy-Proportional-Integral-Derivative (Adaptive-FPID)

<sup>۲</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>۳</sup> Proportional-Integral-Derivative (PID)



مقایسه با کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی مرسوم دارای پاسخ سریع‌تر، اورشوت کمتر و خطای حالت ماندگار کوچک‌تر است. آنچه کنترل موتورهای دیزلی را دشوار می‌سازد، ماهیت غیرخطی آنها است؛ این موتورها نیازمند سیستم‌های کنترلی هوشمندی هستند که بتوانند به سرعت واکنش نشان دهند، از بروز نوسانات شدید جلوگیری کرده و در شرایط صنعتی سخت، ثبات را حفظ کنند. در این میان، واحدهای کنترل الکترونیکی مدرن نقش کلیدی ایفا می‌کنند و به طور پیوسته مصرف سوخت و میزان آلاینده‌ها را بهینه‌سازی می‌نمایند. با وجود اینکه عملگرها نقش حیاتی در تولید توان قابل اعتماد دارند، سیستم‌های امروزی به کنترل‌های پیشرفته دریچه گاز و شبکه‌های حسگر متکی هستند. داس و همکاران [۴] در سیستم کنترل و مانیتورینگ موتور دیزل دریافتند که کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی در مقایسه با کنترل کننده‌های تناسبی و تناسبی انتگرالی عملکرد بهتری از نظر زمان نشست کمتر و حذف خطای حالت ماندگار دارد. در گذشته، تنظیم کننده‌های مکانیکی از نوع چرخ طیار<sup>۱</sup> وظیفه کنترل سرعت را بر عهده داشتند، اما امروزه صنعت به شکل گسترده‌ای به سمت تنظیم کننده‌های الکتریکی حرکت کرده است، چرا که این نوع کنترل کننده‌ها عملکرد دقیق‌تری داشته و نیاز کمتری به تعمیر و نگهداری دارند. در بسیاری از سامانه‌ها، موتورهای دیزلی با ژنراتورهای تخصصی مانند ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم نصب سطحی<sup>۲</sup> ترکیب می‌شوند تا سیستم‌های توان قدرتمند و قابل اعتمادی ایجاد کنند. مهندسان با دقت پارامترهایی مانند توان نامی و مشخصات عملیاتی را تنظیم می‌کنند تا حداکثر بهره‌وری و قابلیت اطمینان حاصل شود [۱]. وجود بار متغیر می‌تواند برای دیزل ژنراتورها چالش محسوب شود. زمانی که بارها به طور ناگهانی تغییر می‌کنند، شرایط پیچیده‌تر می‌شود. ژنراتورهای دیزلی باید به طور مداوم خود را با تغییرات بار تطبیق دهند تا مصرف سوخت در حالت بهینه باقی بماند و عملکرد مطلوب آنها حفظ شود. افزایش ناگهانی بار می‌تواند باعث اشباع تنظیم کننده‌های سرعت شده و نوسانات فرکانس را به دنبال داشته باشد؛ همچنین ولتاژ باس بار نیز با هر تغییر بار دچار نوسان می‌شود و نیازمند کنترل دقیق و سریع است. هانسن و همکاران [۵] با ارائه یک مدل ریاضی کامل برای سیستم پیش‌رانه دیزل-الکترونیک شناور، نشان دادند که کنترل کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی قادر به حفظ پایداری فرکانس و ولتاژ در شرایط مختلف بهره‌برداری هستند. طراحی کنترل کننده‌ها برای چنین شرایطی با دو مانع اساسی روبرو است: اول رفتار غیرقابل پیش‌بینی موتورهای دیزلی که عملکرد آنها بسته به توان خروجی، دور موتور و شرایط محیطی تغییر می‌کند؛ و دوم ناتوانی کنترل کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی سنتی در پاسخ گویایی به این تغییرات مداوم. وانگ و همکاران [۶] با ارائه یک کنترلر ترکیبی برای موتور دیزل دریایی نشان دادند که به‌روز رسانی آنلاین پارامترها منجر به سازگاری و مقاومت بالاتر در برابر تغییرات سرعت و بار می‌شود. مسئله اصلی این است که سیستم‌های کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی سنتی بر پایه پارامترهای ثابت و مدل‌های دقیق بنا شده‌اند؛ رویکردی که با واقعیت پویا و غیرخطی ژنراتورهای دیزلی تحت بارهای متغیر همخوانی ندارد. شن و سو [۷] در طراحی کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی برای موتور دیزل دریایی به این نتیجه رسیدند که این کنترل کننده دارای اورشوت کمتر، زمان پاسخ سریع‌تر و دقت بالاتر نسبت به کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی مرسوم است. با این حال، در پژوهش حاضر از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سیستماتیک پارامترهای سیستم فازی استفاده نمودند که نقطه تمایز اصلی است. شرایط دینامیکی مانند به‌روز رسانی‌های غیر دوره‌ای اندازه‌گیری، برای کنترل کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی سنتی محدودیت‌هایی را به دلیل طراحی آنها ایجاد می‌کند؛ چرا که این کنترل کننده‌ها بر مبنای به‌روز رسانی و اجرای دوره‌ای مقادیر اندازه‌گیری شده عمل می‌کنند. این امر می‌تواند با اعمال بازنشانی‌هایی منجر به انحراف عملکرد کنترلی و کارکرد موردنظر شود. بنابراین بازنگری در طراحی جهت پشتیبانی از به‌روز رسانی‌های غیر دوره‌ای ضروری است. بلوینز [۸] در بررسی پیشرفت‌های کنترل کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی صنعتی نشان داد که تنظیم برخط و تطبیقی پارامترها، امکان تنظیم خودکار کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی را با حداقل دخالت کاربر میسر ساخته است. همچنین تأکید کرد که کنترل کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی با وجود این پیشرفت‌ها، همچنان به عنوان اصلی‌ترین ابزار کنترل در صنعت فرآیندی باقی خواهند ماند. البته راه‌حل کنترلی هوشمندی برای مقابله با چنین چالشی اندیشیده شده است. در واقع

<sup>۱</sup> Fly-Wheel

<sup>۲</sup> Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor



محدودیت‌های ناشی از تنظیم دستی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی و شناخت ناقص از دینامیک سیستم، نیاز به رویکردی تطبیقی‌تر را آشکار می‌سازد. در این راستا، کنترل‌کننده‌های تطبیقی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی خودتنظیم معرفی می‌شوند؛ سیستم‌هایی که توانایی انطباق خودکار با شرایط متغیر را دارند [۶]. کنترل‌کننده‌های فازی تناسبی انتگرالی مشتقی خودتنظیم، در مقایسه با کنترل‌کننده‌های کلاسیک کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی، به مراتب ارجحیت دارند؛ زیرا آن‌ها پاسخگویی بهتری در برابر غیرخطی بودن و عدم قطعیت ارایه می‌دهند و توانایی بیشتری در تامین پاسخ مقاوم، سریع و پایدار سیستم را دارند که در نهایت منجر به ارتقا ثبات کلی می‌شود. این کنترل‌کننده‌ها قادر هستند به طور خودکار و در حین عملکرد، پارامترهای خود را تنظیم کنند. محمد و همکاران [۹] با توسعه یک کنترل‌کننده فازی خودتنظیم برای موتور دیزل نشان دادند که این کنترل‌کننده می‌تواند به صورت برخط پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی در زمان واقعی، کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی عملکرد روان‌تری ارایه می‌دهد، نوسانات سیستم را کاهش می‌دهد و واکنش‌های سریع‌تری در برابر اغتشاش‌ها نشان می‌دهد. در مقایسه با سیستم‌های کنترلی سنتی، این روش پایایی بیشتری از خود نشان می‌دهد و در مواجهه با تغییرات بار، زمان توقف کمتری دارد و با توانایی بالاتر در دفع اختلالات و حفظ پایداری، عملکردی بهتر از کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی معمولی ارایه می‌دهد. هوت و جین [۱۰] در مرور جامع خود بر طراحی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی برای کنترل فرکانس بار نتیجه گرفتند که ترکیب سادگی کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی با روش‌های پیشرفته تنظیم منجر به طراحی کنترل‌کننده‌های کارآمد و مقاوم شده است. سیستم‌های فازی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی مزایای کنترلی دیگری نیز دارند که کمتر به آن اشاره شده. مهم‌ترین آن‌ها این است که این کنترل‌کننده‌ها نیازی به مدل صریح و دقیق سیستم ندارند؛ همچنین می‌توانند بر اساس توصیفات زبانی از دانش انسانی عمل کنند و بدون نیاز به یک مدل ریاضیاتی کامل، پارامترهای خود را بر اساس سیگنال‌های خطا و مشتقات آن‌ها تنظیم نمایند. ژائو و همکاران [۱۱] در پژوهش پایه‌ای خود نشان دادند که استفاده از قواعد فازی می‌تواند کارایی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی را در شرایط گذرا به‌طور چشمگیری بهبود دهد. روش پیشنهادی آن‌ها الهام‌بخش طراحی کنترل‌کننده تطبیقی در پژوهش حاضر بوده است. راز موفقیت این سیستم کنترلی در دیزل ژنراتورها، در استفاده از منطق فازی برای تنظیم دقیق تحویل سوخت، بر اساس خطای لحظه‌ای سرعت و قرائت‌های ولتاژ نهفته است. نتیجه این رویکرد، کاهش انحراف‌های سرعت در هنگام تغییر بار، ساده سازی فرآیند کنترل است که در نهایت به بهبود کلی عملکرد سیستم ختم می‌شود؛ آن هم در حالی که الزامات سخت گیرانه صنعتی را برآورده می‌سازد. مطالعه مک‌گوون و همکاران [۱۲] در پیاده‌سازی یک کنترل‌کننده هیبریدی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی بر روی دیزل ژنراتور نشان داد که این کنترل‌کننده با استفاده از ورودی اضافی ولتاژ به عنوان سیگنال پیش‌کننده، در بارهای مقاومتی منجر به بهبود محسوس پایداری سرعت می‌شود. با این حال، بر خلاف پژوهش حاضر که از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سیستماتیک پارامترها استفاده می‌کند، مطالعه مذکور بر چالش‌های عملکرد این کنترل‌کننده در بارهای راکتیو (به دلیل واکنش نامطلوب بخش وابسته به ولتاژ) و نیاز به شناسایی مؤلفه توان حقیقی بار تأکید داشت. این در حالی است که کنترل‌کننده پیشنهادی در این پژوهش که یک کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی خودتنظیم با مکانیزم بهینه‌شده است، عملکرد یکنواخت و مستحکم‌تری در انواع مختلف بار ارایه می‌دهد. بهره‌گیری از راهکارهای کنترل هوشمند برای حل چالش‌های کیفیت توان در تحقیقات جدید مورد تأکید قرار دارد. پژوهش مالیک و همکاران [۱۳] نشان می‌دهد که به کارگیری یک الگوریتم کنترلی تطبیقی مبتنی بر ترکیب منطق فازی و کنترل‌کننده کلاسیک تناسبی انتگرالی، می‌تواند به شکل مؤثری نوسانات ولتاژ را در شبکه‌های توزیع مهار کند. در این تحقیق، یک دستگاه جبران‌ساز سری پویا با هسته کنترلی هوشمند طراحی شد که برتری عملکردی محسوسی در مقایسه با روش‌های متعارف از خود نشان داد.

اثر بخشی معماری‌های کنترلی تلفیقی تنها به حوزه تولید توان محدود نمی‌شود و در سایر سامانه‌های غیرخطی و دارای عدم قطعیت نیز نتایج درخشانی را به همراه داشته است. شواهد این ادعا را می‌توان در مطالعه تیپ و تین [۱۴] مشاهده نمود، جایی



که یک پهباد چهارپره مجهز به یک کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی، وظیفه حفظ پایداری در حین حمل محموله‌ای خارجی را بر عهده داشت. ارزیابی‌های تجربی گویای آن بود که این راهبرد هوشمند در قیاس با کنترل کننده‌های متعارف، از قابلیت بالاتری در کاهش نوسانات گذرا و زدودن خطای ماندگار برخوردار است، به‌ویژه هنگامی که سیستم در معرض تغییرات پارامتری و اغتشاشات ناشی از بار قرار می‌گیرد. این دستاورد، ظرفیت ذاتی منطق فازی در تنظیم پویای ضرایب و تضمین عملکرد مقاوم را به تصویر می‌کشد؛ قابلیتی که در پژوهش حاضر نیز برای غلبه بر چالش‌های کنترل دیزل ژنراتور در شرایط بار متغیر، مورد استفاده قرار گرفته است. البته همان طور که در کاربرد منطق فازی لزوم استفاده از الگوریتم‌های جستجوی اکتشافی و روش‌های بهینه‌سازی محور و الگوریتم‌های تکاملی نشان داده شده است، برای دستیابی به پاسخ مطلوب با بکارگیری کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی، ضروری است توابع عضویت با استفاده از بهینه‌سازی تکراری بهبود یابند تا کنترل دقیق‌تری بر سیستم حاصل شود [۲، ۱۵]. لی و همکاران [۱۵] در تحلیل جامع خود از سیستم‌های کنترل تناسبی انتگرالی مشتقی، راهکارهایی برای کاهش اثرات نامطلوب بخش انتگرال و مشتق ارائه کردند و نشان دادند که طراحی چند هدفه بهینه هم در حوزه زمان و هم فرکانس امکان‌پذیر است.

هدف این مقاله طراحی و ارزیابی یک کنترل کننده تطبیقی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی بهینه شده برای دیزل ژنراتور تحت شرایط تغییر بار است، به گونه‌ای که عملکرد سیستم در برابر اغتشاش‌ها و رفتارهای غیرخطی بهبود یافته و استحکام و کارایی کلی افزایش یابد.

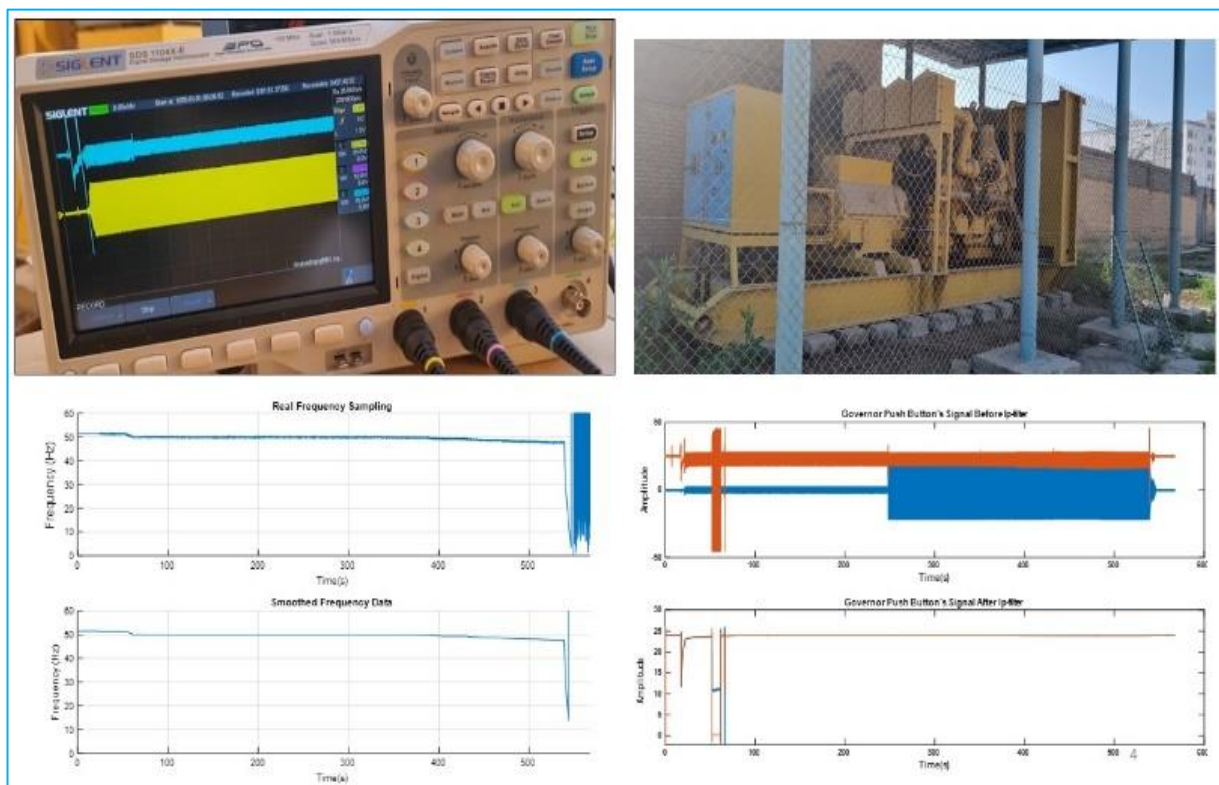
## مواد و روش‌ها

### مدلسازی سیستم

این بخش، به مدل‌سازی دینامیکی سیستم دیزل ژنراتور به همراه سیستم گاورنر مطابق شکل (۱) می‌پردازد. با استفاده از معادلات دیفرانسیلی حاکم بر سیستم، مدل ریاضی و توابع تبدیل استخراج گردیده و تاثیر پارامترهای موثر بر پاسخ دینامیکی سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است. دیزل ژنراتور مورد مطالعه یک سیستم سه فاز با توان نامی ۱۰۰۰ کیلو ولت آمپر و ولتاژ خروجی ۳۸۰ ولت می‌باشد که برای تامین برق پایدار در کاربردهای سنگین نظیر روشنایی استادیوم‌ها طراحی شده است. این سیستم قادر است به صورت همزمان چندین پایه روشنایی پرمصرف را بدون ایجاد نوسانات محسوس در ولتاژ خروجی تغذیه نماید. پایداری ولتاژ خروجی توسط یک سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ<sup>۱</sup> پیشرفته تضمین می‌کند که با تنظیم دقیق جریان تحریک، ولتاژ را در محدوده مطلوب حفظ نماید. از سوی دیگر، کنترل فرکانس و سرعت توسط سیستم گاورنر انجام می‌شود که با تنظیم میزان سوخت ورودی به موتور دیزل، سرعت دوران آن را ثابت نگه می‌دارد. این موتور دیزل شانزده سیلندر با توان ۱۳۰۰ اسب بخار، پاسخگویی سریع به تغییرات بار را ممکن می‌سازد. این ویژگی‌ها در کنار سیستم کنترل پیشرفته مبتنی بر الگوریتم کنترلی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی، عملکرد دقیق و پایدار کل سیستم را در شرایط کاری مختلف تضمین می‌کنند. برای افزایش دقت در مدل‌سازی و اطمینان از همخوانی نتایج شبیه‌سازی با رفتار واقعی، بخشی از داده‌ها از طریق بازدید میدانی جمع‌آوری گردید. در این راستا، از اسیلوسکوپ دیجیتال برای ثبت تغییرات فرکانس و نمونه‌برداری استفاده شد که امکان مشاهده مستقیم رفتار دینامیکی سیستم در شرایط واقعی را فراهم ساخت. همچنین، نمودار تغییرات فرکانس برحسب زمان در طول اعمال تغییر بار استخراج گردید و به عنوان مرجعی برای اعتبار سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های ثبت شده با استفاده از نرم افزار متلب<sup>۲</sup> پردازش شده و برای کاهش نویز، فیلتر مناسب بر روی سیگنال‌ها اعمال گردید. این تصاویر علاوه بر ارائه شواهد تجربی از رفتار واقعی دیزل ژنراتور، پایه‌ای برای تطبیق مدل مرتبه دوم انتخاب شده با نتایج عملی فراهم می‌کنند.

<sup>۱</sup> Automatic Voltage Regulator (AVR)

<sup>۲</sup> MATLAB Software



شکل ۱: دو تصویر بالا نمونه برداری از دیزل ژنراتور با استفاده از اسیلوسکوپ در بازدید میدانی و دو تصویر پایین آنالیز داده های نمونه برداری شده در محیط نرم افزار متلب

### مدلسازی دینامیکی دیزل ژنراتور

برای طراحی و تحلیل کنترل کننده، پیش از هر چیز لازم است یک مدل ریاضی مناسب از دیزل ژنراتور در دست باشد. یافته‌های پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی این سیستم را می‌توان با دقت مطلوب از طریق یک مدل مرتبه دوم توصیف کرد. هرچند این مدل ساده‌سازی شده است، اما توانایی آن در بازنمایی پاسخ دینامیکی بسیار بالا بوده و دقت آن برای بررسی عملکرد کنترلی از دیدگاه عملی قابل قبول گزارش شده است. به کارگیری مدل مرتبه دوم نه تنها در این تحقیق، بلکه در بخش بزرگی از ادبیات پژوهشی نیز رایج است. دلیل این انتخاب، تعادلی است که میان سادگی ساختار و دقت نتایج برقرار می‌کند؛ از این رو این مدل به عنوان یک گزینه استاندارد در تحلیل سیستم‌های دیزل ژنراتور شناخته می‌شود. در همین راستا، در این پژوهش نیز معادله مرتبه دوم به عنوان تابع تبدیل اصلی سیستم انتخاب شد، چراکه کفایت لازم برای بررسی و طراحی کنترل کننده‌های مختلف از جمله کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی و فازی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی را دارا است. معادله دینامیکی چرخشی روتور دیزل ژنراتور با معادله دیفرانسیل (۱) توصیف می‌شود.

$$J\ddot{\theta}(t) + D\dot{\theta}(t) + K\theta(t) = K_f u(t) \quad (1)$$

جایی که،  $J\ddot{\theta}(t)$  بیانگر مقاومت روتور در برابر شتاب زاویه‌ای؛  $D\dot{\theta}(t)$  نشان‌دهنده تلفات اصطکاکی و میرایی؛  $K\theta(t)$  اثر بازگرداننده گشتاور الاستیک؛  $K_f u(t)$  گشتاور ورودی حاصل از سیستم کنترل سوخت.

مدل فضای حالت

برای تبدیل معادله (۱) به فرم فضای حالت، متغیرهای حالت، به شرح تعریف می‌شوند:  $x_1 = \theta(t), x_2 = \dot{\theta}(t)$   
 معادلات حالت نیز به صورت روابط (۲) و (۳) استخراج می‌شوند.



$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{D}{J}x_2(t) - \frac{K}{J}x_1(t) + \frac{K_f}{J}u(t) \quad (3)$$

معادلات حالت به فرم استاندارد:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} & -\frac{D}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_f}{J} \end{bmatrix} u(t) \quad (4)$$

معادله خروجی (سرعت زاویه ای):

$$y(t) = \dot{\theta}(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

با تبدیل لاپلاس معادله شماره (۱)، معادله از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده می شود.

$$Js^2\theta(s) + Ds\theta(s) + K\theta(s) = K_f U(s) \quad (6)$$

تابع تبدیل:

$$G_{dg}(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_f}{Js^2 + Ds + K} \quad (7)$$

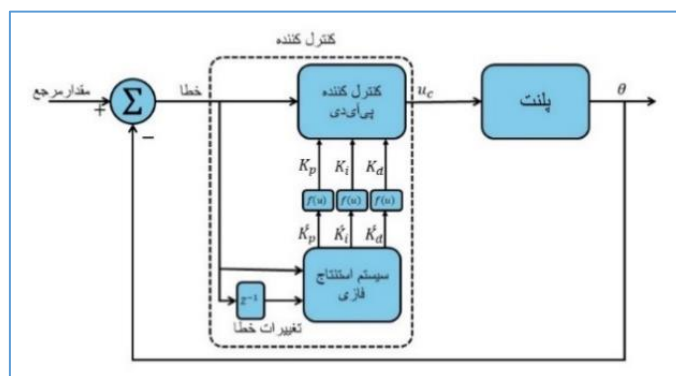
برای آنکه مدل سازی با نتایج بازدید میدانی سازگار گردد و تحلیلی ساده سازی شده اما معتبر ارائه شود، مقادیر پارامترهای اصلی به صورت نرمال انتخاب شدند. مقادیر  $J$  و  $K_f$  برابر ۱، اثر بازگردانده گشتاور الاستیک  $K = 1$  و تلفات اصطکاکی و میرایی  $D = 1/4$  در نظر گرفته شد. بنابراین تابع تبدیل کلی دیزل ژنراتور به صورت رابطه (۸) تعریف می شود.

$$G_{Plant}(s) = \frac{1}{s^2 + 1.4s + 1} \quad (8)$$

انتخاب این ضرایب با رفتار مشاهده شده در داده های میدانی همخوانی دارد؛ محاسبات نشان می دهد که مدل حاضر، فراجهبشی در حدود ۴/۶ درصد و زمان نشست نزدیک به ۶/۹۷ ثانیه محاسبه می کند. این مقادیر با روند کاهش سریع و میرایی نسبی نوسانات فرکانس که در آزمایش های میدانی ثبت شده اند، مطابقت دارند. در ادامه، این مدل به عنوان پلنت در محیط نرم افزار متلب مورد استفاده قرار گرفته و پایه ای برای طراحی و مقایسه کنترل کننده های تناسبی انتگرالی مشتقی و فازی تناسبی انتگرالی مشتقی، فراهم می سازد.

طراحی و بهینه سازی کنترل کننده ترکیبی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی

کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی، به منظور ثابت نگه داشتن فرکانس خروجی دیزل ژنراتور روی مقدار نامی ۵۰ هرتز طراحی شده است تا در اثر تغییرات بار، نوسانات به کمترین حد ممکن برسند. این کنترل کننده ترکیبی، با تلفیق کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک و منطق فازی، به صورت پویا و تطبیقی ضرایب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی را تنظیم می کند تا در شرایط مختلف عملکرد بهینه ای ارائه دهد. فرکانس خروجی دیزل ژنراتور، اندازه گیری شده و خطا ( $e$ ) و نرخ تغییر خطا ( $\dot{e}$ ) محاسبه می شوند. سپس کنترل فازی بر اساس این دو سیگنال ورودی، ضرایب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی را به صورت لحظه ای به روزرسانی می کند و به این ترتیب فرکانس خروجی در مقدار نامی خود ثابت می ماند. فرآیند کنترلی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی در شکل (۲) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲: ساختار سیستم کنترل کننده تطبیقی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی

مکانیسم تبدیل خروجی‌های فازی به مقادیر موثر تناسبی انتگرالی مشتقی

به منظور تبدیل خروجی‌های نرمال شده سیستم استنتاج فازی (در بازه  $[0, 1]$ ) به مقادیر موثر و فیزیکی ضرایب تناسبی انتگرالی مشتقی، از یک مکانیسم تبدیل خطی مبتنی بر دانش کلاسیک کنترل استفاده شده است. مقادیر پایه برای این تبدیل، بر مبنای طراحی اولیه کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی با استفاده از روش زیگلر-نیکولز تعیین گردید. با استناد به این روش، که به ارایه روابط تنظیم ضرایب برای انواع پاسخ‌های مطلوب می‌پردازد:

- مقادیر حداقل هر ضریب منطبق بر طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک<sup>۱</sup> این روش انتخاب شدند. این مقادیر پایه، یک عملکرد پایدار و قابل قبول را تضمین می‌کنند.
  - مقادیر حداکثر متناظر با طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی با مقداری فرابیش<sup>۲</sup> در نظر گرفته شدند. این کران بالا، پتانسیل سیستم برای ارایه پاسخ سریع‌تر و پویاتر را فراهم می‌سازد.
- بدین ترتیب، مقدار نهایی هر یک از ضرایب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی در هر لحظه با استفاده از روابط خطی (۹) الی (۱۱) و بر اساس خروجی متناظر سیستم فازی محاسبه می‌گردد.

$$K_p = \hat{K}_p(K_{p_{max}} - K_{p_{min}}) + K_{p_{min}} \quad (9)$$

$$K_i = \hat{K}_i(K_{i_{max}} - K_{i_{min}}) + K_{i_{min}} \quad (10)$$

$$K_d = \hat{K}_d(K_{d_{max}} - K_{d_{min}}) + K_{d_{min}} \quad (11)$$

این مکانیسم هوشمند، دو مزیت اصلی به دنبال دارد:

۱. تلفیق مبانی نظری کنترل با قابلیت‌های استدلال فازی: با تعریف محدوده‌ای معقول و مهندسی شده برای ضرایب، از تولید مقادیر نامعقول یا ناپایدار توسط سیستم فازی جلوگیری می‌شود و خروجی کنترل کننده همواره در یک چارچوب مطمئن باقی می‌ماند.

۲. ایجاد رفتار تطبیقی پایدار: سیستم فازی این توانایی را پیدا می‌کند که نه تنها روند تغییر ضرایب (افزایش یا کاهش) را تعیین کند، بلکه میزان این تغییر را نیز به صورت پویا و در بازه‌ای از پیش تعریف شده و بهینه، مدیریت نماید. هنگامی که خروجی فازی برای یک ضریب برابر ۱ باشد، آن ضریب به مقدار حداکثری (مربوط به طراحی با فرابیش) میل می‌کند و هنگامی که خروجی فازی صفر باشد، ضریب به مقدار حداقلی (مربوط به طراحی کلاسیک) نزدیک می‌شود.

<sup>۱</sup> Classic PID

<sup>۲</sup> Overshoot

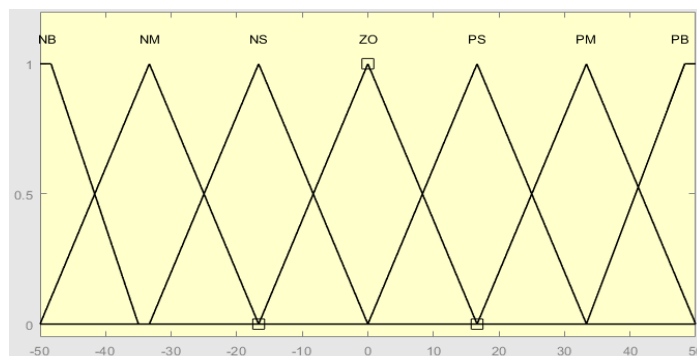


این رویکرد، تعادلی پایدار بین سرعت و پایداری برقرار ساخته و هسته اصلی توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در ارایه عملکرد تطبیقی و مقاوم را تشکیل می‌دهد. در طراحی بخش تناسبی انتگرالی مشتقی، سه پارامتر اصلی تعریف می‌شود: بهره تناسبی مسئول پاسخ سریع به خطای فعلی است و شدت عکس‌العمل کنترل‌کننده را تعیین می‌کند، بهره انتگرالی با جمع‌آوری خطاهای گذشته برای حذف خطای ماندگار استفاده می‌شود. بهره مشتقی که اثر میراکنندگی دارد و باعث کاهش نوسانات سیستم می‌شود. کاهش مقدار بهره مشتقی در کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی احتمالاً سیستم را سریع‌تر اما نوسانی‌تر می‌کند، زیرا اثر میرایی را کاهش داده و به طور بالقوه باعث افزایش فراجهدش می‌شود. احمد و همکاران [۱۶] در بررسی اثر کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی بر پاسخ اینرسی در ژنراتورهای القایی دوطرفه تغذیه‌شده دریافتند که افزایش بهره تناسبی به طور مستقیم حداقل فرکانس را بهبود بخشیده و خطای حالت ماندگار را کاهش می‌دهد. هو و همکاران [۱۷] در تنظیم کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی برای سیستم‌های نوسانی با تاخیر زمانی، از کمینه‌سازی شاخص انتگرال زمان-قدرمطلق خطا تحت قید مقاوم استفاده کردند و نشان که دادند این معیار می‌تواند تعادل مناسبی بین عملکرد و مقاومت ایجاد کند. بر این اساس، سه بهره اصلی کنترل‌کننده (تناسبی، انتگرالی و مشتقی) و نقش هر یک در بهبود پاسخ سیستم در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱: بررسی وظایف ضرایب کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی

معیار	نقش کلیدی	وقتی کوچک باشد...	وقتی بزرگ باشد...
بهره تناسبی	واکنش به خطای فعلی	پاسخ آرام، امکان باقی ماندن خطای ماندگار	پاسخ سریع، ولی احتمال فراجهدش
بهره انتگرالی	حذف خطای ماندگار	باقی ماندن خطای ماندگار، سیستم پایدارتر	کاهش خطای ماندگار، احتمال نوسان
بهره مشتقی	میرا کردن پاسخ	سیستم سریع‌تر ولی نوسانی‌تر می‌شود	پاسخ کندتر ولی پایدارتر

مقادیر اولیه این ضرایب با روش کلاسیک زیگلر-نیکولز<sup>۱</sup> تعیین شده و سپس از طریق شبیه‌سازی، برای دستیابی به پاسخ دینامیکی مطلوب با کم‌ترین نوسان، بهینه‌سازی می‌شوند. بخش کنترل فازی با هدف تنظیم پویا و بهبود عملکرد سیستم در برابر تغییرات بار و رفتارهای غیرخطی طراحی شده است. ورودی‌های این کنترل‌کننده شامل خطای فرکانس ( $e$ ) در بازه  $[-50, +50]$  و مشتق خطا ( $\dot{e}$ ) در بازه  $[-10, +10]$  است. هر یک از این ورودی‌ها با استفاده از توابع عضویت مثلثی به هفت مجموعه‌ی فازی تقسیم شده‌اند. توابع عضویت مربوط به این ورودی‌ها در شکل‌های (۳) و (۴) نمایش داده شده‌اند. خروجی‌های سیستم فازی نیز که مسئول تنظیم بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی هستند، در دو سطح فازی کوچک و بزرگ تعریف شده‌اند. این خروجی‌ها نیز با توابع عضویت مثلثی و به صورت متقارن در بازه  $[0, +1]$  دسته‌بندی شده‌اند (شکل ۵).

شکل ۳: توابع عضویت برای ورودی خطا ( $e$ )<sup>۱</sup> Ziegler-Nichols







## بررسی ساختار و منطق حاکم بر جدول قوانین فازی

جدول (۲) هسته مرکزی سیستم استنتاج فازی را تشکیل می‌دهد، از یک ماتریس  $7 \times 7$  تشکیل شده است. ردیف‌های این جدول به متغیر زبانی خطا ( $e$ ) و ستون‌های آن به نرخ تغییر خطا ( $\dot{e}$ ) تعلق دارند. هر سلول از این جدول یک قانون «اگر-آنگاه» را نشان می‌دهد که خروجی آن، یک ترکیب سه‌تایی از مقادیر زبانی B (بزرگ) و S (کوچک) برای متغیرهای ضرایب تناسبی، انتگرالی، مشتقی است. در ادامه، تحلیل این جدول از سه بعد متغیر خطا، نرخ تغییرات خطا و تعامل بین این دو متغیر آورده شده است.

۱. تحلیل بر اساس تغییرات خطا ( $e$ ): (الف) ردیف‌های NB و PB (خطای بزرگ منفی و مثبت): یکنواختی قابل توجهی در این دو ردیف دیده می‌شود. در تمامی این ردیف‌ها، مقدار ضریب تناسبی همواره B و مقدار ضریب مشتقی همواره S است. این الگو نشان‌دهنده یک راهبرد ثابت و قوی برای مواجهه با خطاهای بزرگ است: اعمال یک عمل کنترلی قوی ( $K_p = B$ ) برای کاهش سریع خطا، همزمان با کاهش اثر میرایی ( $K_d = S$ ) برای جلوگیری از ایجاد نوسانات شدید در آغاز فرآیند. (ب) ردیف‌های NM و PM (خطای متوسط): در این ردیف‌ها، قوانین شروع به تغییر و نشان دادن رفتار پویاتر می‌کنند. مقدار ضریب تناسبی عموماً B باقی می‌ماند، اما مقدار ضرایب مشتقی و انتگرالی بر اساس نرخ تغییر خطا ( $\dot{e}$ ) تغییر می‌کنند که نشان از آغاز توجه سیستم به پایداری دارد. (ج) ردیف‌های NS، ZO و PS (خطاهای کوچک و منطقه تعادل): در این ناحیه، راهکار کاملاً معکوس می‌شود. مقدار ضریب تناسبی عموماً به S کاهش می‌یابد تا از فراجهد جلوگیری شود. در مقابل، مقدار ضریب مشتقی به طور چشمگیری به B افزایش می‌یابد تا با تقویت اثر میرایی، نوسانات را سریع‌تر میرا کرده و پایداری سیستم را در نقطه کار مطلوب تضمین کند.

۲. تحلیل بر اساس نرخ تغییرات خطا ( $\dot{e}$ ): (الف) ستون‌های NB و PB (نرخ تغییر خطای بزرگ): هنگامی که سیستم با سرعت زیادی از نقطه مطلوب دور می‌شود یا به آن نزدیک می‌شود، قوانین تمایل دارند ضریب تناسبی را بزرگ و ضریب مشتقی را کوچک نگه دارند تا بتوانند با این تغییرات سریع مقابله کنند. (ب) ستون ZO (نرخ تغییر خطای نزدیک به صفر): این ستون یک الگوی بسیار واضح و یکنواخت را نشان می‌دهد. هنگامی که نرخ تغییر خطا نزدیک به صفر است (یعنی سیستم در یک حالت ساکن یا با سرعت تغییر بسیار کم قرار دارد)، کنترل‌کننده بدون در نظر گرفتن مقدار خطا، از یک راهکار ثابت و قدرتمند پیروی می‌کند. در تمامی سلول‌های این ستون، ترکیب قوانین به صورت  $B|B|S$  یعنی  $K_p = B$ ،  $K_i = B$  و  $K_d = S$  است. این الگو حاکی از آن است که در چنین شرایطی، اولویت اصلی کنترل‌کننده، اعمال یک عمل کنترلی قوی و پایدار برای حذف خطا است. بهره بالای تناسبی ( $K_p = B$ ) یک پاسخ سریع به خطای موجود می‌دهد، و بهره بالای انتگرالی ( $K_i = B$ ) تضمین می‌کند که خطای حالت ماندگار به طور کامل حذف خواهد شد. همزمان، بهره مشتقی ( $K_d = S$ ) کوچک انتخاب شده تا از ایجاد حساسیت بیش از حد به نویز یا تغییرات بسیار کوچک در خروجی که می‌تواند در حالت‌های تقریباً ساکن مشکل‌ساز شود، جلوگیری کند. این راهکار یکنواخت، کارایی و پایداری کنترل‌کننده را در شرایطی که سیستم فاقد تغییر قابل توجه است، تضمین می‌نماید.

۳. تحلیل تعامل بین متغیرهای خطا و نرخ تغییرات خطا ( $e$  و  $\dot{e}$ ): (الف) سلول (PB, PB) و (NB, NB): زمانی که هم خطا و هم نرخ تغییر آن بزرگ و هم‌علامت هستند (یعنی سیستم در حال دور شدن سریع از نقطه مطلوب است)، بنابراین کنترل‌کننده قوی‌ترین پاسخ خود یعنی  $K_p = B$ ،  $K_i = B$  و  $K_d = S$  را اعمال می‌کند. (ب) سلول (ZO, ZO): در حالت ایده‌آل که خطا و نرخ تغییر آن صفر است، کنترل‌کننده همه ضرایب را روی B تنظیم می‌کند. این ترکیب، هدف «حذف خطای ماندگار» و «میرایی هرگونه نوسان کوچک» را به طور همزمان دنبال می‌کند.

الگوی حاکم بر جدول، یک راهبرد دوگانه را نشان می‌دهد: در نواحی دور از نقطه تعادل، کنترل‌کننده سریع و قوی رفتار می‌کند و اولویت با کاهش سریع خطا است. در نواحی نزدیک به نقطه تعادل، کنترل‌کننده به یک تنظیم‌گر دقیق و پایدار ساز تبدیل می‌شود و اولویت با جلوگیری از نوسان و حفظ پایداری است. این تغییر رفتار هوشمندانه که بر اساس دو متغیر  $e$  و  $\dot{e}$  انجام می‌پذیرد، کلید برتری کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی در مدیریت سیستم‌های غیرخطی و متغیر با زمان است.



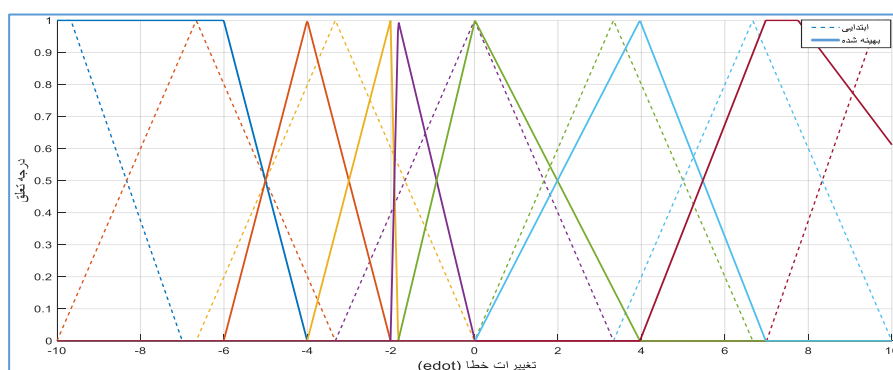
## بهینه‌سازی توابع عضویت با الگوریتم ژنتیک

مطالعه کو و همکاران [۱۸] بر چالش تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی در سیستم‌های غیرخطی تاکید کرده و یک روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای (برخط-برون خط) را ارایه کردند. در مرحله اول، آنها از یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه در محیط شبیه‌سازی برای یافتن توابع بهینه زمان‌بندی بهره‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی استفاده کردند. در مرحله دوم، این پارامترهای بهینه اولیه در یک الگوریتم به صورت مکرر بر روی سکو آزمایش واقعی، به صورت آنلاین تنظیم نهایی شدند. این رویکرد ترکیبی، با کاهش فضای جستجو حول جواب اولیه بهینه‌شده در شبیه‌سازی، نیاز به آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر روی سخت‌افزار واقعی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. نتایج آزمایش‌ها بر روی یک شیر غیرخطی نشان داد که کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی با بهره‌دارای زمان‌بندی بهینه‌شده با این روش، عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی با بهره ثابت دارد این تحقیق به وضوح کارایی استفاده از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه را نه تنها برای طراحی برون خط، بلکه برای تنظیم دقیق و عملیاتی کنترل‌کننده‌ها در محیط واقعی نشان می‌دهد.

در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک برای تنظیم همزمان پارامترهای کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی به کار گرفته شده است؛ این پارامترها شامل توابع عضویت ورودی‌ها (خطا و تغییرات خطا) و ضرایب خروجی (تناسبی، انتگرالی و مشتقی) هستند. هدف اصلی از این بهینه‌سازی، کمینه‌سازی شاخص خطا (انتگرال وزنی مربع خطا بر حسب زمان)، پاسخ سیستم را نرم‌تر و پایداری دینامیکی آن را بهبود می‌بخشد.

فرایند بهینه‌سازی در چند مرحله انجام گردید: ابتدا یک جمعیت اولیه شامل ۸۰ کروموزوم تصادفی تولید شد که هر کدام ۴۰ پارامتر (۱۱ مرکز برای ورودی خطا، ۱۱ مرکز برای تغییرات خطا، و ۱۸ پارامتر برای خروجی‌ها) را دربر می‌گرفت. برای محاسبه برازندگی، مقدار شاخص خطا در هر بار شبیه‌سازی به دست آمد. انتخاب والدین بر اساس روش چرخ رولت انجام شد تا کروموزوم‌های قوی‌تر شانس بیشتری داشته باشند. سپس به منظور جلوگیری از همگرایی زودرس، عملیات تقاطع یکنواخت برای ترکیب ویژگی‌های والدین و عملیات جهش با احتمال ۱٪ به کار رفت. نسل جدید با ترکیبی از ۷۰٪ فرزندان و ۳۰٪ والدین برتر تشکیل شد. معیار توقف نیز رسیدن به ۱۰۰۰ نسل یا بهبود کمتر از ۰/۱٪ در مقدار شاخص خطا در نظر گرفته شد.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم ژنتیک توانسته است زمان نشست سیستم را به ۲/۰۷ ثانیه و درصد فراجاهش را به ۰/۶۶ درصد کاهش دهد. بهترین مقدار تابع هزینه نیز برابر با ۱۰۵/۸ به دست آمد. که نشان دهنده دقت قابل قبول الگوریتم در رعایت قیود طراحی است. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی در ۴۴۳ نسل به جواب بهینه رسید.



شکل ۶: مقایسه توابع عضویت بهینه نشده با توابع عضویت بهینه شده ورودی تغییرات خطا

## سناریوهای آزمایش جهت شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده، مجموعه‌ای از سناریوهای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد تا رفتار سیستم در شرایط مختلف بارگذاری و اغتشاش‌های خارجی مورد بررسی قرار گیرد. این سناریوها به گونه‌ای انتخاب گردیدند که هم عملکرد دینامیکی سیستم و هم توانایی آن در حفظ پایداری و دقت خروجی را مورد سنجش قرار دهند.



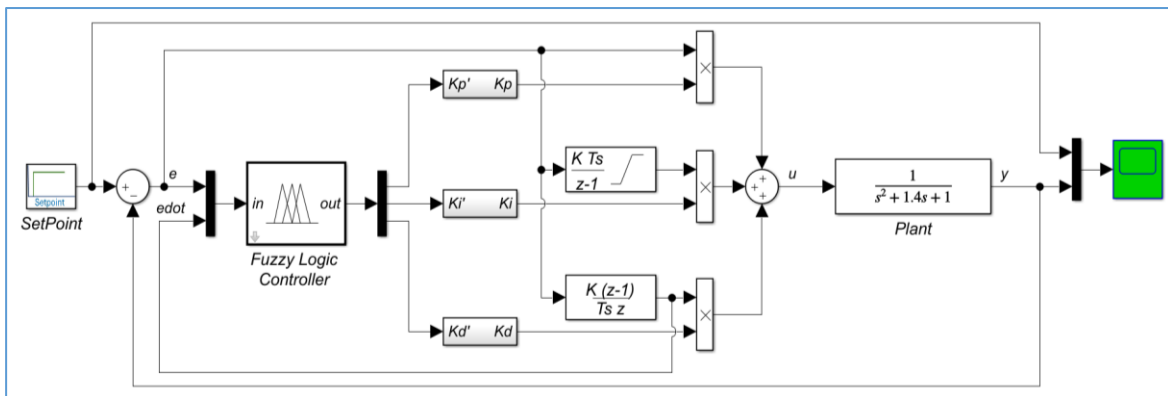
در این راستا، آزمایش‌های انجام شده شامل موارد زیر بودند:

- پاسخ پله واحد: به منظور بررسی معیارهای عملکردی شامل زمان نشست، زمان صعود و میزان فراجهش در هر دو کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک و فازی تناسبی انتگرالی مشتقی؛
- ردیابی نقطه مرجع: جهت ارزیابی توانایی کنترل‌کننده در پیروی از تغییرات مقادیر مطلوب و کاهش خطای حالت ماندگار؛
- اعمال اغتشاش پله‌ای بار: بررسی مقاومت سیستم در برابر اختلال و حفظ پایداری فرکانس در شرایط تغییر ناگهانی بار؛
- مقایسه عملکرد کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک و فازی تناسبی انتگرالی مشتقی: با هدف بررسی بهبودهای حاصل از به‌کارگیری منطق فازی در کاهش نوسانات، افزایش سرعت رسیدن به حالت پایدار و ارتقای پایداری کلی سیستم. انتخاب این سناریوها امکان تحلیل رفتار سیستم را فراهم کرده و نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی نه تنها در شرایط ایده‌آل، بلکه در مواجهه با اغتشاش‌ها و تغییرات بار نیز عملکرد برتری نسبت به کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک ارائه می‌دهد.

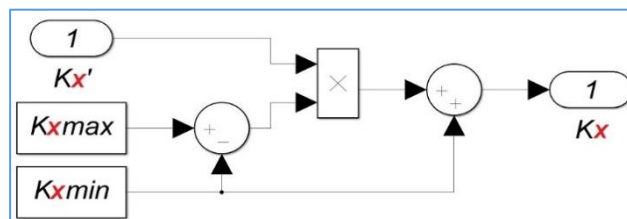
### شبیه‌سازی

#### شبیه‌سازی در سیمولینک متلب

به منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، شبیه‌سازی سیستم در محیط سیمولینک/متلب انجام شده است. نسخه مورد استفاده از نرم افزار ۲۰۱۸b بوده و برای دستیابی به تقریب مناسب از رفتار واقعی سیستم، تنظیمات شبیه‌سازی به صورت گام ثابت با اندازه گام  $10^{-2}$  انتخاب گردیده است. در این راستا، مطابق شکل‌های (۷) و (۸) ابتدا بلوک دیاگرام کلی سیستم شامل مدل ریاضی فرآیند، کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی و بخش‌های ورودی و خروجی طراحی شده است. لازم به ذکر است که ساختار کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی به کار رفته در این پژوهش با الهام از مرجع [۱۱] توسعه یافته و تمامی محاسبات مرتبط با آن در این تحقیق مجدداً پیاده‌سازی و بررسی شده‌اند.



شکل ۷: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی در محیط سیمولینک



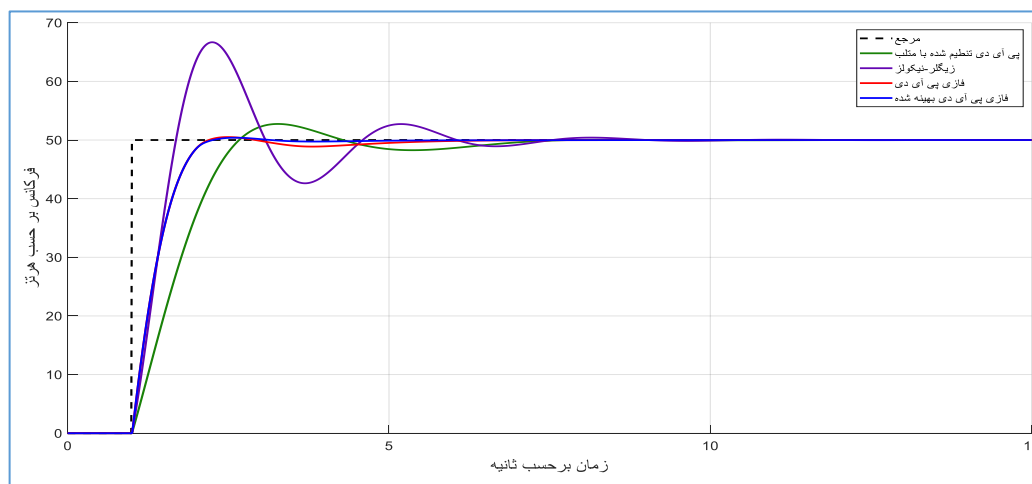
شکل ۸: نحوه محاسبه ضرایب در بازه حداقل و حداکثر،  $\underline{x}$  در آن

نماینده جملات تناسبی (p)، انتگرالی (i) و مشتقی (d)



## مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها

در این بخش، سناریوهای آزمایشی مختلف از جمله پاسخ پله، تعقیب نقطه مرجع و اعمال اغتشاش خارجی بر سیستم مورد بررسی قرار گرفتند. خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها در قالب نمودارهای مقایسه‌ای نمایش داده شده‌اند که نشان می‌دهند کنترل‌کننده فازی تناسبی-انتگرالی مشتقی نسبت به روش کلاسیک، بهبود قابل توجهی در کاهش زمان نشست، حذف خطای ماندگار و محدود سازی نوسانات دارد. بدین صورت، نتایج شبیه‌سازی نقش مهمی در صحت سنجی قوانین فازی طراحی شده و تایید کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی ایفا می‌کنند. در شکل (۹) نمودار پاسخ سیستم به بار پله‌ای نشان داده شده است.

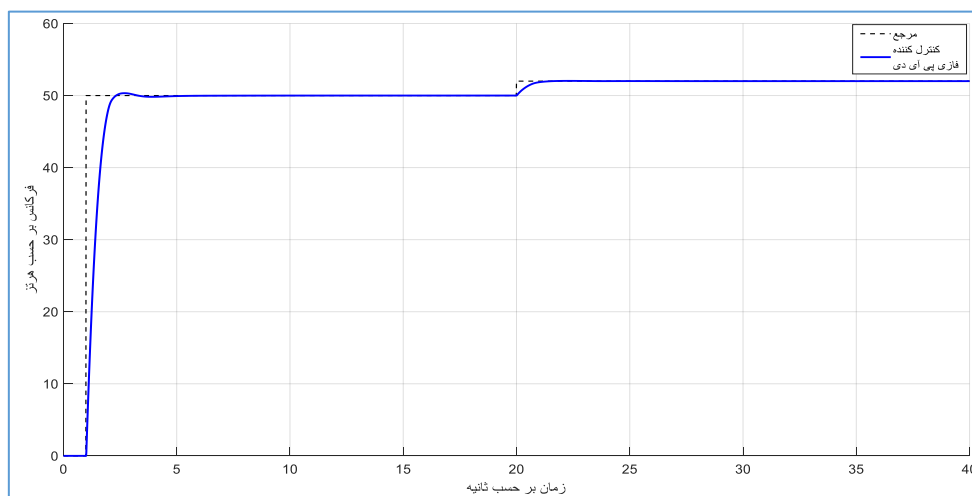


شکل ۹: مقایسه عملکرد کنترلی در مواجهه با بار پله‌ای

برای ارزیابی دقیق کارایی روش پیشنهادی، عملکرد کنترل‌کننده فازی تناسبی-انتگرالی مشتقی در شرایط یکسان با کلاسیک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مشتقی شبیه‌سازی و مقایسه گردید. در این بررسی، شاخص‌هایی همچون زمان نشست، خطای ماندگار، میزان فراجهش و تعداد نوسانات خروجی مورد توجه قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که کنترل‌کننده فازی تناسبی-انتگرالی مشتقی توانسته است با کاهش محسوس خطای حالت ماندگار، بهبود چشمگیر در پاسخ گذرا و همچنین محدود سازی نوسانات خروجی نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک، عملکرد بهتری را ارائه کند. علاوه بر این، در برابر اغتشاش‌های خارجی نیز واکنشی سریع‌تر و مؤثرتر از خود نشان داده است. جمع‌بندی این مقایسه‌ها در جدول (۳) ارائه شده تا تفاوت دو روش در شاخص‌های کلیدی عملکرد به طور روشن قابل مشاهده باشد.

جدول ۳: ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها جهت نمودارهای شکل (۹)

معیار	کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مشتقی تنظیم شده با زیگلر-نیکولز	کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مشتقی تنظیم شده با متلب	فازی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مشتقی بهینه نشده	فازی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مشتقی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک
فراجهش	۱۶/۰۰۷۸	۲/۷۷۴	۰/۳۸۹۴	۰/۳۲۹۶
درصد فراجهش	۳۲/۰۲	۵/۵۵	۰/۷۸	۰/۶۶
زمان نشست (معیار ۲٪)	۵/۸ ثانیه	۶/۳۴ ثانیه	۳/۸۸ ثانیه	۲/۰۷ ثانیه
زمان صعود	۰/۵۳ ثانیه	۱/۱۹ ثانیه	۰/۷۵ ثانیه	۰/۷۵ ثانیه
مقدار نهایی	۴۹/۹۹۹۸	۵۰	۵۰	۵۰
تعداد نوسان	۶	۴	۱	۱

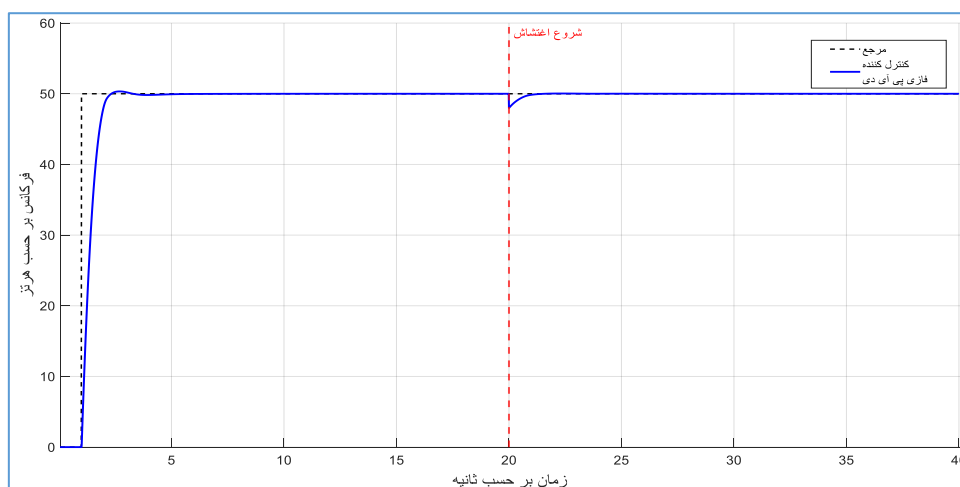


شکل ۱۰: نمودار پاسخ سیستم کنترلی بهینه شده به تعقیب نقطه‌ی مرجع

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی توانایی مناسبی را در دنبال کردن تغییرات مرجع با خطای اندک دارد. در این سناریو، فرکانس مرجع از ۵۰ به ۵۲ هرتز افزایش یافته تا قابلیت سیستم در تعقیب مرجع بررسی شود. همان طور که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی تغییرات را سریع و بدون نوسان چشمگیر دنبال کرده و خطای ماندگار را کاملاً حذف می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در برابر تغییرات ناگهانی مرجع پایدار و دقیق عمل می‌کند.

جدول ۴: ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی نسبت به تعقیب نقطه مرجع در نمودار شکل (۱۰)

معیار	پاسخ در زمان بیشتر از ۲۰ ثانیه	پاسخ در زمان بین ۱ تا ۲۰ ثانیه
فراجهش	۰/۰۳۵۵	۰/۳۲۹۶۰
درصد فراجهش	۱/۷۸ (در ۲ واحد افزایش)	۰/۱۶۶
زمان نشست (معیار ۲٪)	۱/۳۵ ثانیه	۲/۰۷ ثانیه
زمان صعود	۰/۸۴ ثانیه	۰/۷۵ ثانیه
مقدار نهایی	۵۲	۵۰
تعداد نوسان	۱	۱



شکل ۱۱: نمودار پاسخ سیستم کنترلی بهینه شده به اغتشاش ورودی پله



شکل (۱۱) واکنش سیستم فازی تناسبی انتگرالی مشتقی در برابر اغتشاش ناگهانی بار را نمایش می‌دهد. در این آزمایش یک اغتشاش پله ای با کاهش دو واحدی فرکانس اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی توانسته است اثر اغتشاش را سریعاً برطرف کرده و خروجی را به مقدار مطلوب بازگرداند. در مقایسه با کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک، نوسانات کمتر و زمان بازپایی کوتاه‌تر بوده که برتری روش پیشنهادی را تایید می‌کند.

جدول ۵: ارزیابی عملکرد کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی نسبت به ورودی اغتشاش پله در نمودار شکل (۱۱)

معیار	پاسخ در زمان بیشتر از ۲۰ ثانیه	پاسخ در زمان بین ۱ تا ۲۰ ثانیه
فراجهش	۰/۰۳۵۵	۰/۳۲۹۶
درصد فراجهش	۱/۷۸ (برای ۲ واحد کاهش)	۰/۶۶
زمان نشست (معیار ۲٪)	۱/۳۱ ثانیه	۲/۰۷ ثانیه
زمان صعود	۰/۸ ثانیه	۰/۷۵ ثانیه
مقدار نهایی	۵۰	۵۰
تعداد نوسان	۱	۱

#### بررسی پاسخ کنترل کننده

در این تحقیق، منظور از رفتار پایدار، کاهش تعداد نوسانات خروجی سیستم است. شاخصی که مستقیماً نشان دهنده سطح میرایی و پایداری دینامیکی سیستم محسوب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها بیانگر آن است که استفاده از کنترل کننده فازی تناسبی انتگرالی مشتقی در مقایسه با کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کلاسیک، موجب کاهش محسوس تعداد نوسانات خروجی شده است و در نتیجه پاسخ سیستم نرم‌تر، هموارتر و پایدارتر حاصل گردیده است. این بهبود نشان می‌دهد که بهره‌های تطبیقی فازی توانسته‌اند به طور مؤثر میرایی سیستم را در شرایط گذرا تقویت کنند و از ایجاد نوسانات مکرر در حالت‌های دینامیکی جلوگیری نمایند. افزون بر این، تحلیل رفتار سیستم نشان می‌دهد که نقش هر یک از ضرایب فازی در کنترل میرایی به وضوح قابل مشاهده است؛ به طوری که، تنظیم تطبیقی بهره مشتقی باعث افزایش میرایی در خطاهای کوچک و نزدیک به نقطه تعادل شده، در حالی که تغییرات بهره تناسبی و بهره انتگرالی در شرایط خطای بزرگ و متوسط مانع از بروز نوسانات ناخواسته و ایجاد فراجهش می‌شوند. بدین ترتیب، ساختار پیشنهادی فازی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی نه تنها پایداری دینامیکی سیستم را ارتقا می‌دهد بلکه کیفیت کلی پاسخ را در سناریوهای مختلف کاری نیز بهبود می‌بخشد.

#### نتایج

در سال‌های اخیر، استفاده از کنترل کننده‌های ترکیبی هوشمند، به‌ویژه در سیستم‌های پیچیده و غیرخطی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اسپین و همکاران [۱۹] یک کنترل کننده ترکیبی مبتنی بر روش کنترل لغزشی (و منطق فازی تاکاگی-سوگنو را برای کنترل سطح مولدهای بخار در نیروگاه هسته‌ای پیشنهاد کردند. مدل‌سازی فرآیند در این تحقیق به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای شناسایی پارامترهای یک مدل مرتبه کاهش یافته استفاده گردید. این کنترل کننده ترکیبی با استفاده از یک سیستم فازی برای زمان‌بندی بهره، قابلیت تطبیق پذیری و مقاومت بالایی در برابر تغییرات نقطه کار و عدم قطعیت‌های مدل از خود نشان داد. نتایج شبیه‌سازی‌ها بهبود قابل ملاحظه‌ای در ردیابی نقطه مطلوب و رد اغتشاش را تایید کرد. این پژوهش نمونه‌ای موفق از تلفیق یک چارچوب کنترلی مقاوم با یک سیستم استنتاج هوشمند (فازی) و یک الگوریتم بهینه‌سازی قدرتمند فراابتکاری برای دستیابی به عملکردی پایدار و مستحکم در یک سیستم صنعتی بحرانی است.

<sup>۱</sup> Sliding Mode Control (SMC)

<sup>۲</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)



نتایج شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر به وضوح نشان داد که به کارگیری یک کنترل‌کننده ترکیبی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی می‌تواند عملکرد سیستم دیزل ژنراتور را به شکل چشمگیری بهتر کند. در مقایسه با این روش، کنترل‌کننده‌های کلاسیک تناسبی انتگرالی مشتقی هرچند در شرایط عادی و تحت بار ثابت خوب عمل می‌کنند، اما به محض مواجهه با تغییرات ناگهانی یا عوامل اختلالگر، دچار نوسان و خطای قابل توجهی می‌شوند. در مقابل، کنترل‌کننده تطبیقی فازی تناسبی انتگرالی مشتقی به لطف قابلیت تنظیم خودکار پارامترها، سرعت پاسخ سیستم را افزایش داده، نوسانات آنرا کاهش می‌دهد و خطای ماندگار را تقریباً از بین می‌برد. نکته مهم دیگر، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بخش فازی این کنترل‌کننده بود. وقتی نسخه اولیه فازی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی با نمونه بهینه شده آن مقایسه شد، مشاهده گردید که الگوریتم ژنتیک با تنظیم دقیق توابع عضویت، نه تنها نوسانات را کمتر کرد، بلکه حرکت سیستم به سمت نقطه تعادل را نیز نرم‌تر و طبیعی‌تر ساخت. این نشان می‌دهد که ادغام روش‌های هوشمند (فراابتکاری) می‌تواند علاوه بر معیارهای معمول مانند زمان نشست و فراجاهش، پایداری عملیاتی سیستم را نیز به سطح بالاتری ببرد. علاوه بر این، آزمایش‌های مختلفی مانند پاسخ پله، ردیابی سیگنال مرجع و اثر اغتشاش خارجی همگی تایید کردند که کنترل‌کننده پیشنهادی در تمام این شرایط، دقیق و قابل اطمینان است. به‌ویژه در مواقع بروز اغتشاش، سیستم با کنترل فازی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی بسیار سریع به حالت پایدار باز می‌گردد. در مجموع، می‌توان گفت که تلفیق منطق فازی و کنترل کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی، به همراه بهینه‌سازی با الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک، یک راهکار بسیار موثر برای افزایش پایداری و بازدهی دیزل ژنراتورها است. این یافته‌ها به ویژه می‌توانند در شبکه‌های قدرت مستقل یا سیستم‌های برق اضطراری، به ارتقای کیفیت توان و اطمینان پذیری کمک شایانی کنند.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک سیستم کنترل هوشمند ترکیبی از نوع فازی کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی برای مدیریت و تنظیم فرکانس یک دیزل ژنراتور طراحی و شبیه‌سازی شد. برای شروع، یک مدل ساده شده ریاضی از سیستم تهیه شد تا بستر مناسبی برای تحلیل و طراحی کنترل‌کننده فراهم آید. سپس با به‌کارگیری منطق فازی و تعریف قوانینی بر اساس میزان خطا و تغییرات آن، مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی به صورت پویا و تطبیقی تنظیم شدند. برای رسیدن به بهترین عملکرد، از الگوریتم ژنتیک نیز برای بهینه‌سازی و ریزتنظیم کردن توابع عضویت سیستم فازی استفاده شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم افزار سیمولینک/متلب به وضوح نشان داد که این کنترل‌کننده ترکیبی جدید، در قیاس با کنترل‌کننده‌های سنتی تناسبی انتگرالی مشتقی، عملکرد بسیار بهتری دارد. این بهبود هم در معیارهای کلاسیک (مانند کاهش زمان رسیدن به پایداری، کاهش فراجاهش و حذف خطای ماندگار) و هم در کاهش نوسانات مشهود بود. همچنین، در مواجهه با اختلالات ناگهانی، این سیستم کنترلی بسیار سریع‌تر و باثبات‌تر عمل کرد. در یک نگاه کلی، نتایج این تحقیق ثابت می‌کند که تلفیق کنترل فازی و کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی، همراه با بهینه‌سازی هوشمند معیارهای آن، یک راهکار عملی و بسیار مؤثر برای افزایش پایداری و بهبود کیفیت توان خروجی در دیزل ژنراتورها است. این روش به‌ویژه در سیستم‌های قدرت ایزوله یا مواردی که کیفیت فرکانس از حساسیت بالایی برخوردار است، می‌تواند بسیار مفید واقع شود. به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده، می‌توان از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی (مانند روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا الگوریتم رقابت استعماری) استفاده کرد یا با توسعه مدل‌های غیرخطی دقیق‌تر، به شبیه‌سازی‌هایی نزدیک‌تر به دنیای واقعی دست یافت.

### فهرست علائم

$K_f$ : بهره ورودی کنترل؛	$D$ : ضریب میرایی $(N.m/rad)$ ؛
$T$ : ثابت زمانی؛	$J$ : لختی گردشی روتور $(kg.m^2)$ ؛
$u(t)$ : سیگنال کنترل ورودی	$K$ : ثابت سختی سیستم $(N.m/rad)$ ؛





## مراجع

- [1] Lee, S.H., Yim, J.S., Lee, J.H., Sul, S.K., (2008). Design of Speed Control Loop of A Variable Speed Diesel Engine Generator by Electric Governor. 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp 1–5.
- [2] Wei, H., Min, R., Yingqi, T., (2009). A Fuzzy Control System of Diesel Generator Speed. 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp 1–4.
- [3] Yuan, Y., He, Y., Cai, L., Mao, X., (2017). Discrete sliding mode variable structure control over the rotating speed of marine diesel engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 231(5), pp 367–379.
- [4] Das, R.R., Kakkad, S., Kumar, E.V., (2019). Diesel Engine Control and Protection Monitoring using PID Controller. 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), pp 1–6.
- [5] Hansen, J.F., Ådnanes, A.K., Fossen, T.I., (2001). Mathematical Modelling of Diesel-Electric Propulsion Systems for Marine Vessels. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 7(3), pp 323–355.
- [6] Wang, R., Li, X., Ahmed, Q., Liu, Y., Ma, X., (2018). Speed Control of a Marine Engine using Predictive Functional Control based PID Controller. 2018 Annual American Control Conference (ACC), pp 3908–3914.
- [7] Shen, X.Q., Su, Y.X., (2012). Marine Diesel Engine Speed Control System Based on Fuzzy-PID. Applied Mechanics and Materials, 152, pp 1589 – 1594.
- [8] Blevins, T.L., (2012). PID advances in industrial control. IFAC Proceedings Volumes, 45(3), pp 23–28.
- [9] Mohammed, N.F., Song, E., Ma, X., Hayat, Q., (2014). D6114 diesel engine speed control: A case between PID controller and fuzzy logic controller. 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp 275–279.
- [10] Hote, Y.V., Jain, S., (2018). PID controller design for load frequency control: Past, present and future challenges. IFAC-PapersOnLine, 51(4), pp 604–609.
- [11] Zhao, Z.Y., Tomizuka, M., Isaka, S., (1993). Fuzzy gain scheduling of PID controllers. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23(5), pp 1392–1398.
- [12] McGowan, D.J., Morrow, D.J., Fox, B., (2006). Integrated governor control for a diesel-generating set. IEEE Transactions on Energy Conversion, 21(2), pp 476–483.
- [13] Mallick, N., Shiva, C.K., Sen, S., Basetti, V., Mukherjee, V., Reddy, C.S., (2025). Adaptive fuzzy-PI controlled dynamic voltage restorer for mitigating voltage sags. Scientific Reports, 15(1), pp. 16817.
- [14] Do Khac Tiep, N.V.T., (2024). Fuzzy-proportional-integral-derivative-based controller for stable control of unmanned aerial vehicles with external payloads. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 14(5), pp 5094–5106.
- [15] Li, Y., Ang, K.H., Chong, G.C., (2006). PID control system analysis and design. IEEE Control Systems Magazine, 26(1), pp 32–41.
- [16] Ahmad, T., Littler, T., Naeem, W., (2016). Investigating the effect of PID controller on inertial response in doubly fed induction generator (DFIG). 2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL), pp 1–7.
- [17] Hu, X., Tan, W., Hou, G., (2023). Tuning of PID/PIDD2 Controllers for Second-Order Oscillatory Systems with Time Delays. Electronics, 12(14), pp. 3168.
- [18] Qu, S., He, T. and Zhu, G., (2023). Model-Assisted Online Optimization of Gain-Scheduled PID Control Using NSGA-II Iterative Genetic Algorithm. Applied Sciences, 13(11), pp. 6444.
- [19] Espín, J., Estrada, S., Benitez, D., Camacho, O., (2023). A hybrid sliding mode controller approach for level control in the nuclear power plant steam generators. Alexandria Engineering Journal, 64, pp 627–644.