

کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی و بهینه‌یابی پارامترهای کنترل‌کننده فازی تناسبی - مشتقی (جهت تنظیم سوخت موتور توربوجت)

مرتضی منتظری^۱، احسان محمدی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۰۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۰۹

چکیده

در این مقاله با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، به طراحی و بهینه‌یابی کنترل‌کننده فازی تناسبی - مشتقی جهت تنظیم سوخت موتور توربوجت پرداخته شده است. در ابتدا با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی وینر^۱ مدلی با ساختار بلوکی جهت شبیه‌سازی عملکرد موتور توربوجت پیشنهاد شده است که این نوع مدل سازی برای اهدافی نظیر طراحی کنترل‌کننده مناسب می‌باشد. در ادامه با توجه به رفتار غیرخطی موتور، کنترل‌کننده فازی اولیه‌ای که قواعد و پارامترهای آن بر اساس اطلاعات تجربی و شناخت قبلی از رفتار موتور تنظیم شده است، طراحی گردید. در پایان با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، قواعد و پارامترهای کنترل‌کننده فازی اولیه با هدف کاهش میزان مصرف سوخت و همچنین بهبود رفتار سیستم در مود کنترلی گذرا بهینه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده طراحی شده علاوه بر کاهش میزان مصرف سوخت، قادر است پاسخ زمانی و مشخصه‌های عملکردی سیستم نظیر خطای حالت ماندگار، فرجهش و زمان خیزش را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد.

کلید واژه

کنترل‌کننده سوخت، منطق فازی، موتور توربوجت، الگوریتم ژنتیک، مدل وینر.

مقدمه

اغلب هواپیماهای جدید امروزی جهت تولید نیروی پیشرانس مورد نیاز خود، از موتورهای توربین گازی استفاده می‌نمایند. پیش‌بینی رفتار دینامیکی موتور که هم برای طراحی اجزای موتور و هم برای طراحی سیستم کنترل آن ضروری می‌باشد، نیازمند شناختی مناسب از عملکرد موتور در حالت‌های پایا و گذرا است. بنابراین لازمه طراحی سیستم کنترل برای موتور، مدل‌سازی و شبیه‌سازی آن می‌باشد. مهم‌ترین وظایف سیستم‌های کنترل در موتورهای توربین گاز را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: ۱) تامین تراست پایدار؛ ۲) حفظ ثبات در برخی از پارامترهای عملکردی موتور نظیر سرعت روتور، دما و فشار داخلی موتور و همچنین نگهداری آن‌ها در محدوده عملکردی ایمن؛ ۳) فراهم آوردن عملکردی ملایم^۲ در مود گذرا؛ ۴) ممانعت از وقوع تغییرات ناگهانی فشار، سرعت و دما و همچنین جلوگیری از بروز پدیده‌های زیانباری مانند سرج و

استال [۱]. به منظور طراحی سیستم کنترل موتور توربین گاز هوایی، از متغیرهای کنترلی متعددی می‌توان بهره‌جست، اما در این میان دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق، به دلیل تاثیرگذاری قابل توجه آن بر تمامی پارامترهای عملکردی موتور نظیر دور روتور، نسبت فشار کمپرسور، مصرف سوخت ویژه، تراست و دمای ورود به توربین گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود [۱]. با توجه به اهمیت روزافزون توربین‌های گازی در صنایع مختلف به ویژه صنعت هوا فضا و همچنین ضرورت طراحی یک سیستم کنترل مناسب برای موتورهای توربین گازی به عنوان قلب تپنده این صنعت، در سال‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. زیلوچیان و همکارانش [۲] به طراحی و ارزیابی دو نوع کنترل‌کننده فازی با هدف کنترل فشار در محفظه احتراق پرداختند. کنترل‌کننده نوع اول بر اساس تنظیم توابع عضویت و قواعد فازی (مبتنی بر آزمون و خطا) و کنترل‌کننده نوع دوم بر اساس نوعی روش هندسی، طراحی شده است. در نهایت هر دو نوع کنترل‌کننده با مدل غیرخطی موتور آزمایش شده و نتایج آن با نتایج

۱. استاد، montazeri@iust.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، Ehs_Mohammadi@iust.ac.ir (نویسنده مخاطب)

کنترل کننده تناسبی - انتگرالی^۳ نیز مقایسه گردیده است. همچنین در مطالعه‌های دیگر واتانابه^۴ و همکارانش [۳]، به طراحی و تست یک کنترل کننده فاز بر روی موتور توربوپمپ SR-30 پرداختند. در این تحقیق با به کارگیری روش پاسخ فرکانسی، تابع تبدیل سیستم تعیین شده و عملکرد موتور در حضور یک کنترل کننده فاز و یک کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی^۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، ورودی سیستم کنترلی، تراست مطلوب و متغیر کنترلی، دبی سوخت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای کنترل کننده فاز طراحی شده توسط واتانابه بر مبنای آزمون و خطا تنظیم شده است.

جی^۵ و همکارانش [۴] نیز به منظور قرارگیری نقاط عملکردی موتور مابین خطوط سرج و خفگی شعله^۶ در حین عملکرد گذرای موتور، به طراحی یک کنترل کننده فاز تناسبی - انتگرالی برای موتور توربوپمپ یک هواپیمای بدون سرنشین پرداختند. ورودی‌های کنترلر فاز ارائه شده توسط این محققان، خطای لگاریتمی شتاب و خطای نسبت فشار کمپرسور و خروجی آن پارامتر وزن بهره بود که خروجی این کنترلر فاز، وظیفه تعیین پارامترهای یک کنترل کننده تناسبی - انتگرالی کلاسیک را برعهده داشت.

به طور کلی روش‌های متعددی برای طراحی سیستم کنترل سوخت موتورهای توربین گاز وجود دارد که می‌توان آنها را به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم نمود. بدیهی است که با توجه به طبیعت غیرخطی موتورهای توربین گازی، به کارگیری روش‌های کنترلی غیرخطی می‌تواند نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های خطی در پی داشته باشد. در میان روش‌های غیرخطی مرسوم، روش کنترل فاز به دلیل برخورداری از انعطاف پذیری بالا (به دلیل کثرت پارامترهای آن) و همچنین عدم نیاز به مدلی دقیق و پیچیده از سیستم مورد مطالعه، گزینه مناسبی محسوب می‌شود. اما بدیهی است که یافتن توابع عضویت و قواعدی که بتواند عملکرد سیستم را بهینه نماید، نیازمند زمان، تجربه و مهارت در فرایند میزان سازی^۷ می‌باشد. به عبارت دیگر، کثرت پارامترهای یک کنترلر فاز (که از نقاط قوت این نوع کنترلر به حساب می‌آید) در صورت عدم به کارگیری از روشی کارا و قابل اطمینان برای تنظیم پارامترهای این نوع کنترلر، به نقطه ضعف آن بدل می‌شود.

در سال‌های اخیر با بهره‌گیری از روش‌های نوین رایانش نرم^۸ مانند «الگوریتم ژنتیک» با قابلیت جستجوی قدرتمند در فضاها پیچیده، وسیع و نامنظم و همچنین «شبکه عصبی مصنوعی» به عنوان الگوریتمی با توانایی بالا در یادگیری، این مشکل تا حد زیادی

برطرف شده است [۹-۵]. به گونه‌ای که امروزه می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مذکور پارامترها و قواعد کنترلرهای فاز را به گونه‌ای تنظیم نمود که هدف طراح از سیستم کنترل را به خوبی برآورده سازد.

در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک که ابزاری قدرتمند در بهینه‌یابی سراسری بوده و توانایی کاوش در فضاها جستجوی وسیع (با ابعاد بالا) را دارد، برای تنظیم پارامترهای کنترلر فاز تناسبی - مشتقی^۹ با هدف به کارگیری در سیستم کنترل سوخت موتور توربوپمپ استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این مقاله، استراتژی به کار گرفته شده برای بهینه‌یابی پارامترهای قواعد و داده‌ها و همچنین نحوه کدگذاری این پارامترها از جمله عوامل موثر بر بهبود پاسخ‌های حاصل شده، می‌باشند. به طور کلی مباحث ارائه شده در این مقاله را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود. در بخش نخست با به کارگیری روش مدل‌سازی وینر، مدلی با ساختار بلوکی به منظور شبیه‌سازی عملکرد موتور توربوپمپ پیشنهاد شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی این مدل با نتایج به دست آمده از تست موتور مقایسه شده است. در بخش دوم بر مبنای تلفیقی از روش آزمون و خطا (برای تعیین پارامترهای پایگاه داده‌ها) و تجربیات و مشاهدات پیشین از رفتار موتور (به منظور تعیین قواعد فاز)، کنترلر فاز اولیه‌ای طراحی گردید که از آن به عنوان جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک استفاده شد. در بخش سوم با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، قواعد و پارامترهای کنترلر فاز اولیه با هدف کاهش میزان مصرف سوخت و همچنین بهبود رفتار سیستم در مود کنترلی گذرا بهینه گردید.

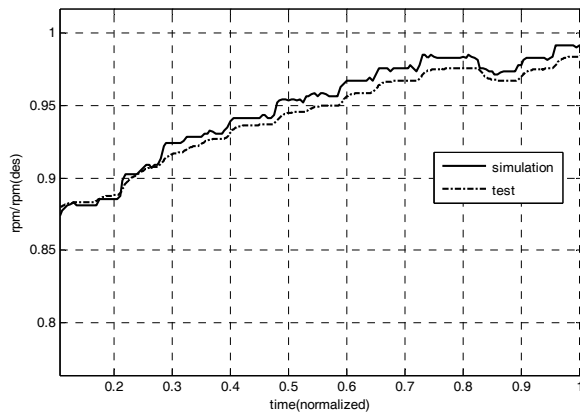
مدل سازی و شبیه سازی عملکرد موتور توربوپمپ

به طور کلی موتورهای توربین گاز، موتورهای پیچیده، غیر خطی و متغیر با زمان بوده که پارامترهای آن با تغییر شرایط کاری دائماً در حال تغییر می‌باشند. از چند دهه قبل تا به حال، مدل‌های بسیاری جهت شبیه‌سازی رفتار موتور توربوپمپ ارائه شده است، که تعدادی در حوزه فرکانس و تعدادی در حوزه زمان بوده است. در سال‌های اولیه، از مدل‌هایی خطی و مرتبه اول که ارتباط میان دبی سوخت ورودی و سرعت دورانی موتور را برقرار می‌نمود، برای شبیه‌سازی رفتار موتور استفاده می‌شده است. با گذشت زمان و به منظور افزایش انعطاف‌پذیری مدل‌های طراحی شده و تامین نیازهای بیشتر، توجه محققان به سوی مدل‌های غیرخطی و پیچیده‌تر جلب شد. این مدل‌های ترمودینامیکی که با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر اجزاء موتور و هماهنگی اجزاء

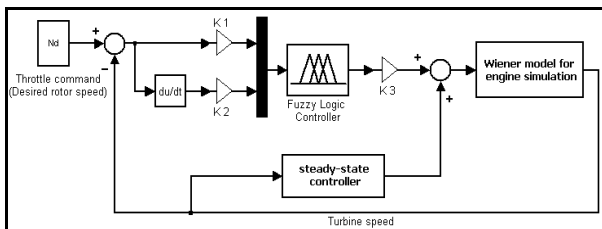
تغییرات سرعت روتور توربین را با به کارگیری مدل وینر و نتایج تست موتور مشاهده نمود. مقایسه نتایج، حاکی از اختلاف اندک و قابل اغماض میان آن دو می باشد. بنابراین مدل پیشنهاد شده علاوه بر فراهم آوردن دقت قابل قبول، می تواند به طور چشمگیری زمان مورد نیاز برای شبیه سازی را نیز کاهش دهد.

طراحی کنترل کننده فازی سوخت

لازمه طراحی یک سیستم فازی مطلوب، تعریف توابع عضویت و قواعد فازی مناسب است که این امر نیاز به شناخت صحیح و دقیق از فیزیک سیستم مورد مطالعه، تجربیات و مشاهدات قبلی دارد. همان گونه که پیش تر بیان شد، به منظور طراحی سیستم کنترل موتور توربوجت، معمولاً از دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق به دلیل فراگیر بودن آن، به عنوان متغیر کنترلی استفاده می شود [۱۲]. به همین منظور دبی سوخت به دو بخش پایا و گذرا تقسیم شده است. دبی سوخت پایا با به کارگیری یک جدول مراجعه که ارتباط میان دور خواسته شده توسط فرمان تراشل و میزان دبی سوخت پایای منطبق بر نقطه تعادل جدید را برقرار می کند، حاصل می گردد.



شکل ۲. تغییرات سرعت روتور توربین بر حسب زمان - مقایسه نتایج تست موتور و مدل وینر.



شکل ۳. نحوه قرارگیری کنترلر پایا و گذرا در مدار کنترلی حلقه بسته موتور.

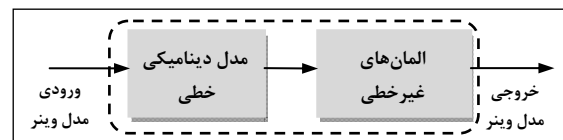
برای تعیین دبی سوخت گذرا از یک کنترلر فازی تناسبی مشتقی که یکی از ورودی های آن خطای سرعت روتور (اختلاف

از نظر کار و جریان در حالت های پایا و گذرا، حاصل شده بودند، قادر به پیش بینی تغییرات دینامیکی ناشی از تغییرات شرایط کاری در محدوده کامل عملکردی موتور بودند.

اگرچه با پیشرفت این مدل ها و افزایش پیچیدگی آنها، تاثیرات فیزیکی حاکم بر عملکرد موتور به گونه ای دقیق تر در نظر گرفته می شد، اما همواره نیاز به مدلی ساده با دقتی قابل قبول که علاوه بر افزایش سرعت شبیه سازی به اعمال تغییر در پارامترهای مدل توسط طراح سهولت ببخشد، احساس می شد.

سیستم های با ساختار بلوکی، سیستم هایی هستند که می توان آنها را به صورت ترکیبی از مدل های دینامیکی خطی و عناصر غیر خطی استاتیکی بیان نمود (شکل ۱). در این مقاله با به کارگیری روش مدل سازی وینر، مدلی با ساختار بلوکی جهت شبیه سازی عملکرد موتور توربوجت پیشنهاد شده است. بر خلاف سایر سیستم های دارای ساختار بلوکی، آنچه که باعث بروز رفتار غیر خطی در این مدل می شود، تغییرات مشخصه های استاتیکی و دینامیکی سیستم به ازای تغییرات ورودی می باشد [۱۰].

همان گونه که پیش تر نیز بیان شد، این مدل از ترکیب یک بخش دینامیکی خطی و یک بخش استاتیکی غیر خطی به صورت سری حاصل شده است. بخش دینامیکی این مدل شامل تابع تبدیل مرتبه اولی است که ثابت زمانی آن نسبت معکوس با سرعت تعادلی روتور توربین دارد. به منظور تعیین ثابت زمانی سیستم باید اطلاعاتی در مورد برخی از مشخصه های حالت پایای موتور در اختیار داشت که این مشخصه ها عبارتند از:

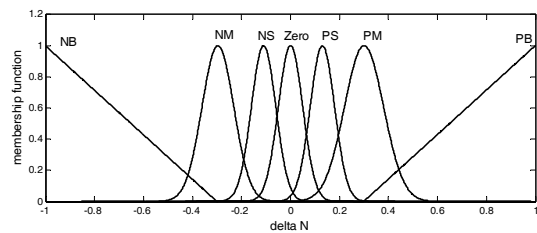


شکل ۱. ساختار مدل وینر.

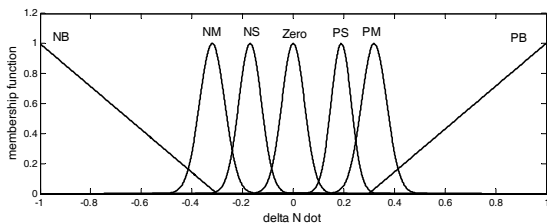
۱) دبی هوای ورودی و میزان افزایش دما در کمپرسور در یکی از نقاط عملکردی پایا؛ ۲) ممان اینرسی روتور. شایان ذکر است که روش به کار رفته در تعیین ثابت زمانی سیستم، بر مبنای تقریبی از گشتاور گذرای توربین و کمپرسور استوار است [۱۱].

بخش استاتیکی غیر خطی این مدل از دو جدول مراجعه^{۱۰} که ارتباط میان دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق را با سرعت روتور و نسبت فشار کمپرسور برقرار می نمایند، تشکیل شده است. لازم به ذکر است که جداول مراجعه مذکور از نتایج تست موتور حاصل شده اند (این داده ها مربوط به نتایج تست یک موتور توربوجت تک محوره بوده و مراحل تست و داده برداری توسط نویسندگان این مقاله انجام شده است). در شکل (۲) می توان

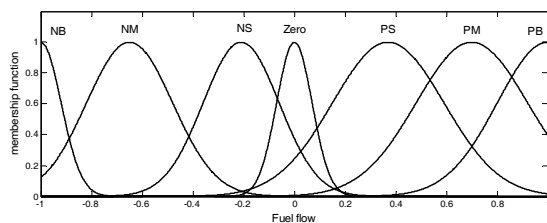
اول میان کنترلر و مدل موتور، تاثیر تاخیر زمانی سیستم سوخت‌رسانی در پاسخ مدل در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. توابع عضویت برای ورودی اول کنترلر فازی اولیه (ΔN).



شکل ۵. توابع عضویت برای ورودی دوم کنترلر فازی اولیه ($\dot{\Delta N}$).



شکل ۶. توابع عضویت برای خروجی کنترلر فازی اولیه (\dot{m}_f).

جدول ۱. جدول قواعد کنترل کننده فازی اولیه

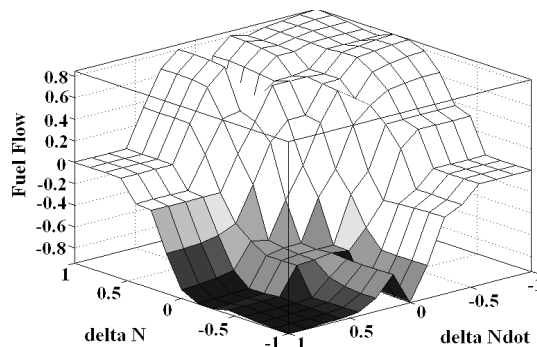
$\Delta \dot{N}$ \ ΔN	Z	PS	PM	PB	NS	NM	NB
Z	Z	PS	PS	Z	NS	NS	NS
PS	NS	Z	PS	PS	NM	NM	NM
PM	NM	NS	Z	PM	NM	NM	NB
PB	NB	NM	NS	Z	NB	NB	NB
NS	PS	PS	PM	PM	Z	NS	NM
NM	PM	PM	PM	PB	PS	Z	NS
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	Z

دور خواسته شده توسط فرمان تراتل و دور واقعی) و ورودی دیگر مشتق آن می‌باشد، استفاده شده است. دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق از مجموع دبی سوخت پایا و گذرا حاصل می‌گردد. استراتژی کنترلی موتور و نحوه قرارگیری کنترلر فازی در مدار کنترلی حلقه بسته، در شکل (۳) نشان داده شده است.

برای ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم کنترل فازی توابع عضویت مختلفی را می‌توان در نظر گرفت که با تغییر نوع و تعداد آنها می‌توان به پاسخ‌های متفاوتی از عملکرد سیستم دست یافت. در تعریف این توابع برای هر متغیر، محدوده تغییرات متغیرهای ورودی و خروجی در بازه $[-1, 1]$ در نظر گرفته شده است. طراحی کنترلرهای فازی معمولاً از توابع عضویت مثلثی و گوسین برای متغیرهای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. همان‌گونه که می‌دانیم برای تعریف هر تابع عضویت از نوع مثلثی به سه پارامتر (سه راس مثلث) و از نوع گوسین به دو پارامتر (مقادیر واریانس و میانگین هر تابع عضویت) نیاز است. با توجه به اینکه هدف نهایی این مقاله بهینه‌یابی پارامترهای کنترلر فازی اولیه با به کارگیری یک الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر جمعیت می‌باشد، بنابراین باید به منظور کاهش وسعت فضای جستجو تا حد امکان تعداد متغیرهای بهینه‌یابی را کاهش داد. به همین جهت برای ورودی‌ها و خروجی کنترلر فازی از توابع عضویت گوسین (که دارای پارامترهای قابل تنظیم کمتری در مقایسه با نوع مثلثی می‌باشد) استفاده شده است. هر کدام از ورودی‌ها و خروجی کنترلر دارای ۷ متغیر زبانی می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- NB: Negative Big
- PS: Positive Small
- NM: Negative Medium
- PM: Positive Medium
- NS: Negative Small
- PB: Positive Big
- Zero: Zero

در شکل‌های (۴-۶) توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی کنترلر فازی اولیه نشان داده شده است. در جدول (۱) قواعد تعریف شده برای کنترلر فازی اولیه مشاهده می‌شود که تعداد این قواعد با توجه به تعداد توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی ۴۹ قاعده می‌باشد. شکل (۷) منحنی تغییرات دبی سوخت گذرا بر حسب تغییرات خطای سرعت و مشتق آن را نشان می‌دهد. در طراحی این کنترلر فازی از موتور استنتاج مینیمم^{۱۱}، استلزام مینیمم ممدانی^{۱۲}، ترم «کمینه»^{۱۳} و فازی‌زدای «مرکز سطح» استفاده شده است.



شکل ۷. تغییرات دبی سوخت گذرا بر حسب خطای سرعت موتور و مشتق آن (کنترلر فازی اولیه)

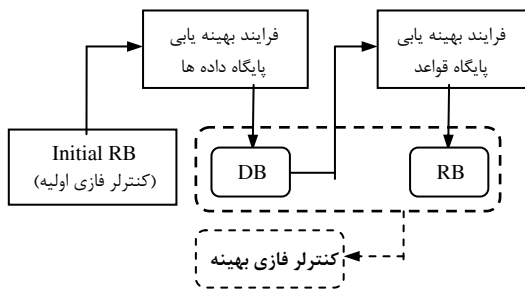
شبه‌سازی حلقه بسته مدل موتور در حضور کنترل کننده فازی در محیط سیمولینک در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، با قرار دادن تابع تبدیل مرتبه

متغیرهای بهینه یابی و همچنین چگونگی تعیین تابع برازش می باشد. در ابتدای بحث لازم است، به این نکته توجه گردد که یک سیستم فازی مبتنی بر دانش^{۱۷} را می توان به دو بخش تقسیم نمود:

- ۱) پایگاه داده ها (DB)^{۱۸} که شامل اطلاعاتی پیرامون ضرایب اصلاح^{۱۹} و پارامترهای توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی کنترل کننده می باشد.
- ۲) پایگاه قواعد (RB)^{۲۰} که شامل مجموعه ای از قواعد فازی می باشد.

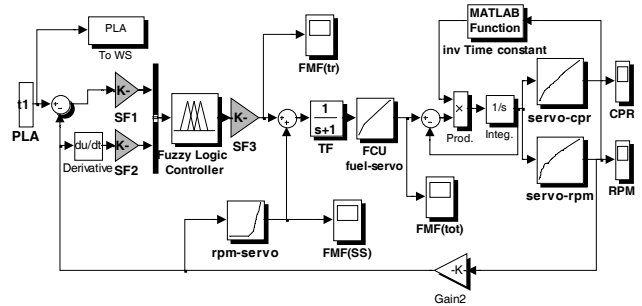
اولین گام در طراحی یک سیستم ژنتیک فازی آن است که تعیین گردد که کدام یک از موارد فوق باید هدف بهینه یابی قرار گیرد. در حالت کلی به منظور بهینه یابی یک کنترلر فازی، می توان از چهار استراتژی زیر بهره برد: [۱۳]

- ۱) بهینه یابی DB به ازای RB معین
- ۲) بهینه یابی RB به ازای DB معین
- ۳) بهینه یابی همزمان DB و RB
- ۴) بهینه یابی RB و DB به صورت متوالی



شکل ۹. استراتژی بهینه یابی (بهینه یابی متوالی DB و RB).

نکته حائز اهمیت آن است که در صورتی که تنها یکی از پایگاه های داده ها و قواعد بهینه شوند و دیگری به صورت تجربی تعیین گردد (موارد ۱ و ۲) بدیهی است که از کارایی فرایند بهینه یابی کاسته خواهد شد. از طرف دیگر بهینه یابی همزمان DB و RB (مورد ۳) منجر به افزایش قابل توجه طول رشته ها می گردد، به گونه ای که انجام فرایند بهینه یابی با مشکل روبرو خواهد شد. بنابراین در این مقاله به منظور حفظ کیفیت پاسخ و همچنین ممانعت از افزایش بیش از حد طول رشته ها، از استراتژی چهارم (بهینه یابی متوالی RB و DB) استفاده شده است. شکل (۹) بیانگر توالی فرایندهای بهینه یابی کنترلر فازی اولیه می باشد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، در مرحله نخست با به کارگیری قواعد کنترلر فازی اولیه به تعیین توابع عضویت و ضرایب اصلاح بهینه پرداخته و در مرحله دوم با بهره گیری از پارامترهای بهینه شده مرحله اول، قواعد فازی نیز بهینه می گردند. با به کارگیری این



شکل ۸. شبیه سازی حلقه بسته موتور با حضور کنترلر فازی

طراحی کنترل کننده ژنتیک - فازی

به طور کلی روش های متعددی جهت ترکیب سیستم های فازی با شیوه های مختلف یادگیری وجود دارد که از رایج ترین آنها می توان به سیستم های ژنتیک فازی اشاره نمود [۱۳]. الگوریتم ژنتیک روشی قدرتمند برای جستجو و بهینه یابی از طریق بهبود تدریجی پاسخ می باشد که بر مبنای اصول سیر تکامل طبیعی، نخستین بار توسط هالند^{۱۴} [۱۴] معرفی گردید و کاربردهای عملی این الگوریتم در حل مسائل پیچیده، توسط جانگ^{۱۵} [۱۵] و گلدبرگ^{۱۶} [۱۶] ارائه شد. اگرچه تاکنون الگوریتم ژنتیک با شکل ها و استراتژی های متنوع در تحقیقات مختلف مورد استفاده واقع شده است، اما در همه موارد از سه عملگر انتخاب، ترکیب متقابل یا برش و عملگر جهش به عنوان عملگرهای اصلی الگوریتم استفاده شده است.

در الگوریتم ژنتیک ابتدا مجموعه ای از رشته ها (کروموزوم ها) به صورت تصادفی از فضای جستجو انتخاب می شوند و جمعیت اولیه را تشکیل می دهند. سپس هر کروموزوم بر مبنای تابع برازش تعیین شده، ارزیابی می شود و در نهایت بر اساس این سنجش به هر کروموزوم ارزشی متناسب با میزان برازش آن تعلق می گیرد. حضور و یا عدم حضور یک کروموزوم در نسل بعد منوط به نتیجه مقایسه برازش آن کروموزوم با میانگین برازش های آن نسل می باشد. عملگر برش وظیفه ترکیب ژن های دو کروموزوم را دارد و عملگر جهش با ایجاد تغییرات تصادفی در ژن های هر کروموزوم، زمینه را برای افزایش تنوع رشته های یک نسل فراهم می آورد. بنابراین با اعمال عملگرهای ژنتیک بر جمعیت اولیه، می توان نسل اول را به وجود آورد. به همین ترتیب با تکرار این مراحل نسل های بعد نیز به وجود می آیند، به گونه ای که پاسخ سیستم با جایگزینی رشته های با برازش بالا به جای رشته های کم ارزش به صورت تدریجی بهبود می یابد.

مهم ترین عاملی که تاثیر قابل توجهی بر کیفیت پاسخ های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک دارد، نحوه کدگذاری پارامترها و

استراتژی علاوه بر دست‌یابی به پاسخ‌هایی با کیفیت بالا، سرعت همگرایی نیز افزایش می‌یابد.

کدگذاری ضرایب اصلاح

به طور کلی، به دلیل وابستگی میان پارامترهای توابع عضویت و ضرایب اصلاح، بهینه‌یابی آن‌ها به صورت مجزا، روش مناسبی جهت دست‌یابی به پاسخ بهینه نخواهد بود [۱۷]. بنابراین در این مقاله، تمامی پارامترهای توابع عضویت و ضرایب اصلاح در یک کروموزوم قرار داده شده است.

ضرایب اصلاح در مقایسه با یک تابع عضویت تنها، تاثیر بسیار بیشتری بر نحوه پاسخ سیستم دارد. زیرا تاثیر ضرایب اصلاح بسیار فراگیرتر و جامع‌تر می‌باشد، به گونه‌ای که تغییر در ضریب اصلاح یک متغیر فازی بر پاسخ تمامی توابع عضویت آن متغیر تاثیرگذار خواهد بود. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، سه ضریب اصلاح برای متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر فازی در نظر گرفته شده است.

کدگذاری پارامترهای توابع عضویت

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، به منظور کاهش پیچیدگی فضای جستجو، باید تا حد امکان پارامترهای بهینه‌یابی کاهش داده شود. به همین جهت با توجه به اینکه توابع عضویت گاوسی شکل تنها دارای دو پارامتر بهینه‌یابی هستند، بنابراین از این نوع توابع عضویت برای متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر فازی استفاده شده است. اگرچه بهینه‌یابی تمامی پارامترهای توابع عضویت به صورت همزمان و قراردادن آنها در یک کروموزوم می‌تواند تا حدی باعث افزایش طول کروموزوم شود، اما در مقابل دقت پاسخ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت.

کدگذاری پایگاه قواعد

به طور کلی سه روش متداول برای کدگذاری پایگاه قواعد فازی با به کارگیری الگوریتم ژنتیک وجود دارد:

- روش میشیگان^{۲۱} [۱۸]؛
- روش آموزش قواعد با تکرار (IRL)^{۲۲} [۱۹]؛
- روش پیترزبرگ^{۲۳} [۲۰]؛

در روش میشیگان هر رشته (کروموزوم) حاوی اطلاعاتی در مورد تنها یک قاعده بوده و در نتیجه تصمیم نهایی سیستم، از تاثیر متقابل رشته‌های تشکیل‌دهنده پایگاه قواعد حاصل می‌شود. با توجه به اینکه در این روش، هر قاعده به صورت فردی ارزیابی می‌شود،

ممکن است برهم کنش قواعد، عملکرد نهایی سیستم را دچار مشکل نماید. در روش آموزش قواعد با تکرار، همانند روش میشیگان هر رشته مشخصات تنها یک قاعده را در خود جای می‌دهد، اما به دلیل آن‌که در هر بار تکرار، تنها یک قاعده (مربوط به بهترین رشته در آن تکرار) به قواعد اولیه افزوده می‌شود، نسبت به روش میشیگان از فضای جستجوی به مراتب کوچکتری برخوردار است. اما مشکل عمده روش IRL آن است که به منظور دستیابی به یک مجموعه کامل از قواعد، باید فرایند بهینه‌یابی چندین مرتبه تکرار شود و این امر حجم محاسباتی زیادی را در پی خواهد داشت. در روش پیترزبرگ، هر رشته حاوی اطلاعات تمامی قواعد موجود در پایگاه قواعد بوده و در نتیجه برهم کنشی میان رشته‌های مختلف وجود نخواهد داشت. به علاوه نحوه کدگذاری در این روش نسبت به روش میشیگان و IRL از پیچیدگی کمتری برخوردار است. در نهایت با بررسی مزایا و معایب هر یک از روش‌های سه‌گانه فوق‌الذکر، در این مطالعه از روش پیترزبرگ به منظور کدگذاری پایگاه قواعد استفاده شده است.

در این مقاله برای هر قاعده یک ضریب وزنی در نظر گرفته شده است که میزان اهمیت و تاثیرگذاری آن قاعده را در پاسخ نهایی کنترلر تعیین می‌نماید. با به کارگیری این نوع کدگذاری می‌توان زمینه را برای حذف قواعد غیر ضروری فراهم کرده و به نوعی تعداد قواعد فازی را نیز بهینه نمود. زیرا در صورت صفر شدن ضریب وزنی هر قاعده، آن قاعده تاثیری بر پاسخ نهایی نخواهد داشت و می‌توان آن را از مجموعه قواعد حذف نمود. اهمیت و ضرورت به کارگیری این روش، به عنوان راهکاری برای حذف قواعد غیر ضروری، با افزایش توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی و در نتیجه افزایش تعداد قواعد فازی، محسوس‌تر خواهد بود. همچنین در این مقاله از کدگذاری اعداد طبیعی برای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، هر قاعده با یک عدد چهار رقمی نمایش داده می‌شود، که سه رقم اول بیانگر شماره متغیرهای زبانی مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر فازی بوده و رقم چهارم مبین ضریب وزنی هر قاعده است. در جدول (۲) شماره مربوط به هر متغیر زبانی را می‌توان مشاهده نمود.

به عنوان نمونه قاعده ۶۵۶۷ را می‌توان به صورت زیر بیان نمود: «اگر تغییرات دور روتور «مثبت متوسط» و شتاب «مثبت کوچک» باشد، آن‌گاه دبی سوخت گذرا، «مثبت متوسط» با ضریب وزنی ۰/۷ است».

مهم دیگری که از طراحی این کنترلر مد نظر است، کاهش میزان مصرف سوخت ورودی به محفظه احتراق موتور می‌باشد. معمولاً شاخص عملکردی یک سیستم از ترکیب وزن دار شده مشخصه‌های عملکردی آن سیستم به دست می‌آید. بنابراین با توجه به مشخصه‌هایی که پیش‌تر برشمردیم، شاخص عملکردی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

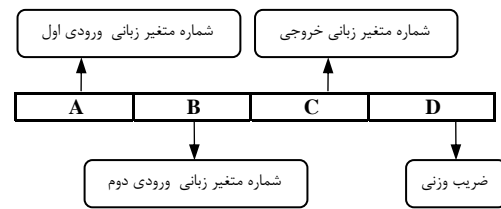
$$J = \frac{1}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} \left\{ w_1 \int_0^T \frac{|N_{des} - N_{ss}|}{\left[|N_{des} - N_{ss}| \right]_{\max}} dt + w_2 \int_0^T \frac{\dot{m}_f}{\left[\dot{m}_f \right]_{\max}} dt + w_3 \int_0^T \frac{|N_{des} - N(t)|}{\left[|N_{des} - N(t)| \right]_{\max}} dt + w_4 \int_0^T \frac{|N_{\max(\min)} - N_{des}|}{\left[|N_{\max(\min)} - N_{des}| \right]_{\max}} dt \right\} \quad (1)$$

که در رابطه فوق $N(t)$ سرعت روتور در ثانیه t ام، N_{des} سرعت مطلوب، N_{ss} سرعت روتور در حالت پایا، \dot{m}_f دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق و T زمان شبیه سازی می‌باشد. همچنین N_{max} و N_{min} به ترتیب حداکثر سرعت در حالت شتابگیری و حداقل سرعت در حالت افت شتاب بوده و w_1 تا w_4 ضرایب وزنی می‌باشند. همان‌گونه که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، هر کدام از مشخصه‌های عملکردی سیستم، ابتدا نرمالیزه شده و سپس بر اساس اهمیتی که طراح برای آن‌ها قائل است، وزن دار می‌گردند.

تحلیل نتایج

پس از کدگذاری پارامترهای کنترلر فازی، فرایند بهینه‌یابی در دو مرحله با به کارگیری عملگرهای «برش» با احتمال $0/8$ و «جهش» با احتمال $0/2$ و همچنین با بهره‌گیری از عملگر «انتخاب» به شیوه چرخ رولت^{۲۵} صورت پذیرفت. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) روند همگرایی تابع برازش در مراحل اول و دوم بهینه‌یابی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در مرحله دوم بهینه‌یابی از ضرایب اصلاح و پارامترهای توابع عضویت بهینه شده (در مرحله اول)، استفاده شده است، لذا سرعت همگرایی تابع برازش در این مرحله افزایش یافته است.

شکل‌های (۱۳-۱۵) توابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر فازی بهینه شده را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۳) مقادیر ضرایب اصلاح برای متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر سوخت گذرا، در شرایط قبل و پس از بهینه‌یابی نشان داده شده است. شکل (۱۶) نیز منحنی تغییرات دبی سوخت گذرا بر حسب تغییرات خطای سرعت و مشتق آن برای کنترلر فازی بهینه را نشان می‌دهد. همچنین قواعد فازی بهینه و ضرایب وزنی مربوط به هر قاعده در جدول (۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰. کدگذاری هر قاعده فازی به صورت یک عدد چهار رقمی.

جدول ۲. شماره گذاری متغیرهای زبانی.

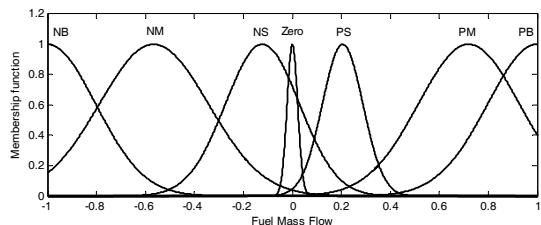
متغیرهای زبانی	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷

معمولاً در بهینه‌یابی پایگاه قواعد فازی به دو فاکتور «دقت» و «تفسیر پذیری» قواعد توجه می‌شود. مهم‌ترین معیار سنجش تفسیر پذیری پایگاه قواعد فازی عبارت است از: «فشرده‌گی» که با تعداد قواعد فازی سنجیده می‌شود و «سادگی قواعد» که بر مبنای تعداد متغیرهای ورودی به کار رفته در هر قاعده، تعیین می‌گردد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، به کارگیری ضریب وزنی برای هر قاعده می‌تواند تعداد قواعد موثر را کاهش داده و در نتیجه میزان تفسیر پذیری پایگاه قواعد را افزایش دهد. همچنین علاوه بر شماره‌های تعیین شده مربوط به هر متغیر زبانی جدول (۲)، شماره «صفر» برای متغیرهای ورودی به معنی حذف آن متغیرها از قاعده مورد نظر می‌باشد که این عمل باعث سادگی آن قاعده و در نتیجه افزایش میزان تفسیر پذیری پایگاه قواعد می‌گردد.

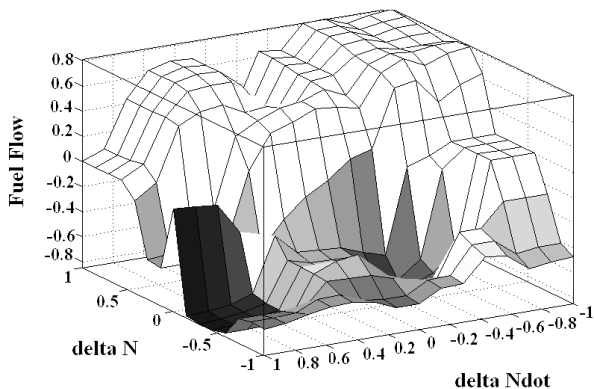
تعریف تابع برازش

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، شایستگی حضور هر کروموزوم در نسل بعد، با ارزیابی آن کروموزوم بر مبنای یک تابع برازش تعیین می‌گردد که تعریف این تابع برازش وابسته به هدف طراحی کنترلر می‌باشد. در این مقاله یکی از اهداف اصلی طراحی کنترلر، بهبود پاسخ زمانی سیستم می‌باشد. کاهش خطای ماندگار سیستم، کاهش میزان فراجشش‌ها و فروجهش‌ها و همچنین دست‌یابی به زمان خیزش^{۲۴} مناسب از عوامل تاثیرگذار در بهبود پاسخ سیستم می‌باشند. به عبارت دیگر باید پارامترهای سیستم فازی به گونه‌ای تنظیم گردد که سیستم در کوتاه‌ترین زمان ممکن به مقدار مطلوب دست‌یافته و در عین حال مقادیر فراجشش، فروجهش و خطای ماندگار سیستم نیز تا حد امکان کاهش یابد. در این مقاله به منظور دست‌یابی به زمان خیزش مناسب، از انتگرال قدر مطلق خطای سرعت (اختلاف میان سرعت واقعی و مطلوب) به عنوان یکی از مشخصه‌های عملکردی سیستم استفاده شده است. همچنین هدف

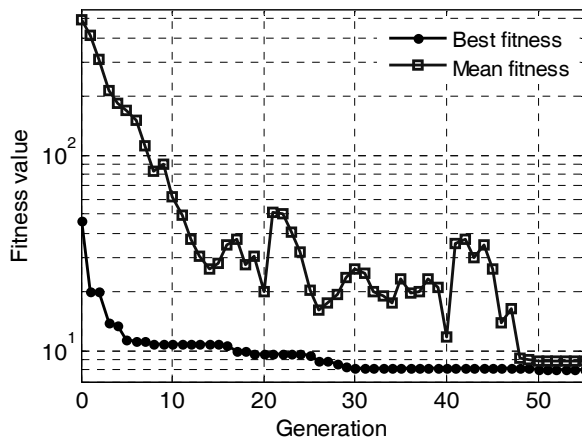
با به کارگیری روش پیشنهاد شده جهت کاهش تعداد قواعد فازی، تعداد این قواعد از ۴۹ به ۳۴ قاعده کاهش یافته است (در حدود ۳۰٪) که مقدار قابل ملاحظه‌ای است و این میزان کاهش در تعداد قواعد، می‌تواند نقش بسزایی در افزایش تفسیرپذیری کنترل کننده فازی ایفا نماید.



شکل ۱۵. توابع عضویت برای خروجی کنترلر ژنتیک فازی (\dot{m}_f)



شکل ۱۶. دبی سوخت گذرا بر حسب خطای سرعت روتور و مشتق آن (کنترلر فازی بهینه)



شکل ۱۱. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک - مرحله اول

جدول ۳. مقادیر ضرایب اصلاح - قبل و پس از بهینه‌یابی

نوع کنترلر	k_1	k_2	k_3
کنترلر فازی اولیه	۱	۱	۱
کنترلر ژنتیک فازی	۲/۹۴	۶/۷۳	۰/۷۱

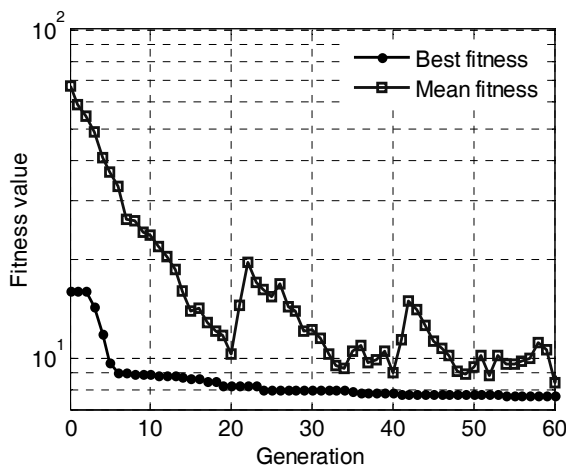
جدول ۴. جدول قواعد کنترل کننده فازی بهینه

$\frac{\Delta N}{\Delta \dot{N}}$	Z	PS	PM	PB	NS	NM	NB
Z	Z (۱)	-	PM (۰/۹)	Z (۰/۹)	Z (۰/۱)	-	NB (۰/۹)
PS	NS (۰/۹)	-	PS (۰/۹)	-	NM (۰/۹)	Z (۰/۹)	NB (۰/۹)
PM	NM (۰/۹)	-	Z (۰/۹)	PM (۰/۹)	-	-	-
PB	NB (۰/۹)	NM (۰/۹)	-	Z (۰/۹)	NB (۰/۹)	NB (۰/۹)	-
NS	PS (۰/۹)	PS (۰/۹)	PM (۰/۹)	PM (۰/۹)	-	NB (۰/۹)	-
NM	PM (۰/۹)	PB (۰/۹)	-	PB (۰/۹)	-	-	NS (۰/۹)
NB	PB (۰/۹)	PB (۰/۹)	-	PB (۰/۹)	-	PS (۰/۹)	Z (۰/۱)

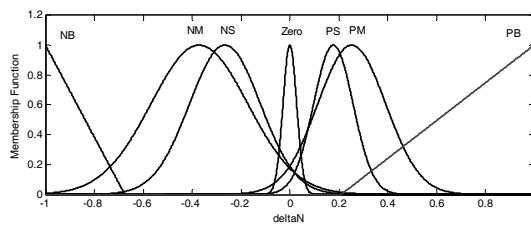
نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که کنترلر ژنتیک فازی طراحی شده در مقایسه با کنترلر فازی اولیه در تمامی مشخصه‌های عملکردی دارای برتری قابل توجهی است. در جدول (۵) مشخصه‌های عملکردی سیستم در حالات مختلف نشان داده شده است.

جدول ۵. مقادیر مشخصه‌های عملکردی سیستم

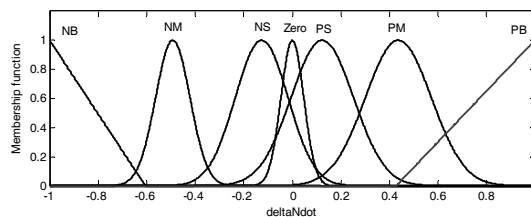
کنترلر ژنتیک فازی	کنترلر فازی اولیه	بدون کنترلر گذرا	
۱/۲۶۶۹	-	۳/۴۰۸۸	بهبود میزان مصرف سوخت نسبت به کنترلر فازی اولیه (%)
۵/۵۳۸۹	۹/۶۸۷۹	۱۲/۷۷۹۲	انتگرال قدرمطلق خطای سرعت (%)
۰/۵۷۷۹	۰/۸۹۳۱	۱۲/۳۱۲۰	خطای حالت ماندگار (%)
۰/۴۴۵۴	۱/۳۶۱۶	۹/۵۵۹۳	مجموع فراجهش و فروجهش ها (%)



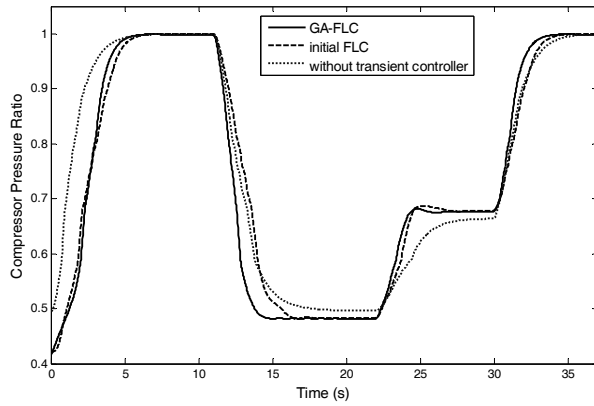
شکل ۱۲. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک - مرحله دوم



شکل ۱۳. توابع عضویت برای ورودی اول کنترلر ژنتیک فازی (ΔN)



شکل ۱۴. توابع عضویت برای ورودی دوم کنترلر ژنتیک فازی ($\Delta \dot{N}$)



شکل ۱۹. نسبت فشار کمپرسور بر حسب زمان

نتیجه گیری

در این مقاله با به کارگیری الگوریتم ژنتیک به طراحی کنترلر ژنتیک فازی برای تنظیم سوخت موتور توربوجت پرداخته شد. در گام اول، مدلی با ساختار بلوکی جهت شبیه‌سازی عملکرد موتور توربوجت پیشنهاد شد که به طور چشمگیری زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی را کاهش داد. مقایسه نتایج حاصل از مدل ارائه شده و نتایج به دست آمده از تست موتور حاکی از اختلاف اندک و قابل قبول میان آن دو می‌باشد. در مرحله دوم کنترلر فازی اولیه‌ای بر مبنای تجربیات و شناخت نسبت به عملکرد موتور ارائه شد که از آن به عنوان جمعیت اولیه به منظور افزایش سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. در مرحله سوم با به کارگیری الگوریتم ژنتیک به عنوان روشی قدرتمند در جستجو و با هدف کاهش میزان مصرف سوخت و بهبود مشخصه‌های عملکردی سیستم، کنترلر فازی اولیه بهینه گردید. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که میزان مصرف سوخت و سایر مشخصات عملکردی سیستم با به کارگیری کنترلر ژنتیک فازی بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است.

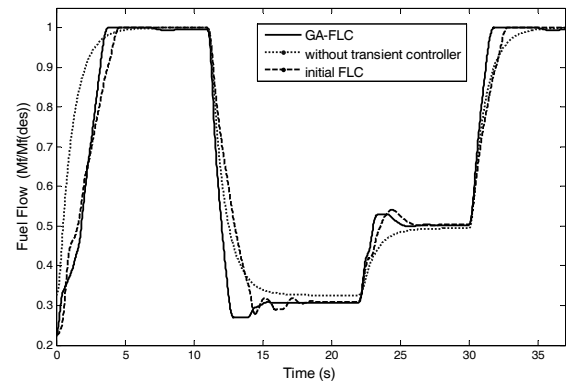
پی نوشت

1. Wiener
2. Smooth
3. Proportional-Integral (PI)
4. Watanabe
5. Proportional-Integral-Derivative (PID)
6. Jie
7. Flame out
8. Tuning
9. Soft Computing
10. Proportional-Derivative (PD)
11. Lookup Table
12. Minimum Inference Engine

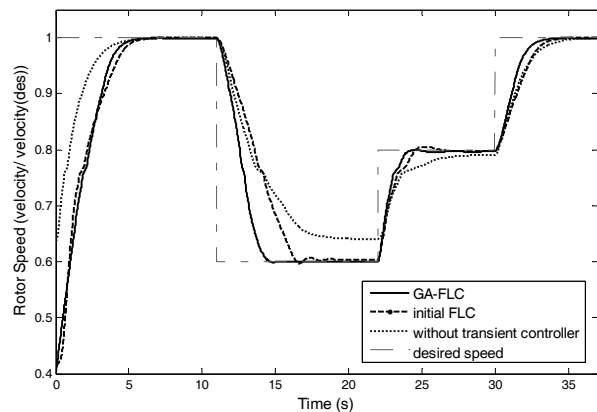
معمولاً با کاهش زمان خیزش در یک سیستم، مقدار فراجاهش در پاسخ آن سیستم افزایش می‌یابد و طراحی کنترلری که بتواند میزان فراجاهش و زمان خیزش را همزمان کاهش دهد، با تنظیم دستی پارامترهای کنترلر فازی و بدون استفاده از یک الگوریتم بهینه‌یابی قدرتمند، بسیار دشوار و طاقت فرسا خواهد بود.

شکل (۱۷) دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق (مجموع دبی سوخت پایا و گذرا) را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات سرعت روتور توربین و نسبت فشار کمپرسور در حالت‌های بدون کنترلر، با کنترلر فازی اولیه و بالاخره با حضور کنترلر فازی بهینه شده، در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۷-۱۹) مشاهده می‌شود، با به کارگیری کنترلر ژنتیک فازی، سیستم سوخت‌رسانی واکنش بسیار سریعی به تغییرات فرمان دسته گاز می‌دهد و در عین حال مانع از فرارفت سرعت روتور و نسبت فشار کمپرسور از حداکثر مقدار مجاز می‌شود. بنابراین عملکرد کنترلر طراحی شده به گونه‌ای است که به طور قابل ملاحظه‌ای قدرت مانور هواپیما و توانایی ردیابی خطای سرعت را افزایش داده و مصرف سوخت و سایر پارامترهای عملکردی سیستم را نیز در وضعیت مطلوبی قرار می‌دهد.



شکل ۱۷. دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق بر حسب زمان



شکل ۱۸. سرعت روتور توربین بر حسب زمان

- based Fuzzy Inference System, *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3):665-685.
10. Kulikov, Gennady G. Thompson, Haydn A. 2004. *Dynamic Modeling of Gas Turbines*, Published by Springer.
 11. Gold, H., and S. Rosenzweig. 1952. A method for estimating speed response of gas-turbine engines, *National Advisory Committee for Aeronautics*.
 12. Cohen, H., Rogers G. F. C, and Saravanamuttoo H. I. H. 1996. *Gas turbine theory*, printed by T. J. press padstow cornwall, 4th edition.
 13. Cordon, O., F. Gomide, F. Herrera, F. Hoffmann, and L. Magdalena. 2004. Ten years of genetic fuzzy systems: current framework and new trends, *Fuzzy Sets and Systems*.
 14. Holland, John H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, the University of Michigan Press.
 15. De Jong, Kenneth. A. 1975. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, PhD dissertation, University of Michigan.
 16. Goldberg, D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley.
 17. Cai, L., A. B. Rad, and W. L. Chan. 2007. A Genetic Fuzzy Controller for Vehicle Automatic Steering Control, *IEEE transactions on vehicular technology* 56 (2).
 18. Holland, J. H., and J. S. Reitman. 1978. Cognitive systems based on adaptive algorithms, *Pattern-Directed Inference Systems*, Academic Press, New York.
 19. Venturini, Gilles. 1993. A supervised inductive algorithm with genetic search for learning attribute based concepts, In Proc. European Conference on Machine Learning, Vienna.
 20. Smith, S. F. 1980. A learning system based on genetic adaptive algorithms, PhD dissertation, Department of Computer Science, University of Pittsburgh.
 21. Akhenak, A., M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin. 2007. Multiple Model Approach Modeling: Application to a Turbojet Engine, *Journal of Engineering and Applied Sciences*.
 22. Montazeri-Gh, M. and M. Safarabadi. 2004. Application of fuzzy logic in the design of Turbojet Engine Fuel Control system, 5th Iranian Conference in Fuzzy Systems.
 23. Montazeri-Gh, M. and M. Safarabadi. 2004. Fuzzy-Based Gas Turbine Fuel Control System, CDIC04, China.
 13. Mamdani minimum implication
 14. Min
 15. Holland
 16. Jong
 17. Goldberg
 18. Knowledge Base
 19. Data Base (DB)
 20. Scaling Factor
 21. Rule Base (RB)
 22. Michigan
 23. Iterative Rule Learning (IRL)
 24. Pittsburgh
 25. Rise Time
 26. Roulette Wheel
- ### مراجع
1. Mattingly. Jack D., William H. Heiser, and David T. Pratt. 2002. *Aircraft Engine Design*, Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Second Edition.
 2. Zilouchian, A., M. Juliano, T. Healy, and J. Davis. 2000. Design of a fuzzy logic controller for a jet engine fuel system, *Control Engineering Practice* 8, pp. 873-883.
 3. Watanabe, A., S. M. Olçmen, R. P. Leland, K. W. Whitaker, L. C. Trevino, and C. Nott. 2006. Soft computing applications on a SR-30 turbojet engine, *Fuzzy Sets and Systems* 157, pp. 3007 – 3024.
 4. Jie M. S., E. J. Mo, and K. W. Lee. 2007. Fuzzy PI Controller for Turbojet Engine of Unmanned Aircraft, *Hankuk Aviation University, 200-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
 5. Karr, Charles L. 1991. Design of and adaptive fuzzy logic controller using a genetic algorithm, In Proc. of the 4th International Conference on Genetic Algorithms, San Diego, 13.-16., pp. 450-457.
 6. Kinzel, J, F. Klawoon, and R. Kruse. 1994. Modifications of genetic algorithms for designing and optimizing fuzzy controllers, In Proc. 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, Orlando, USA, pp. 28-33.
 7. Bonissone, P. P., P. S. Khedkar, and Y. Chen. 1996. Genetic algorithms for automated tuning of fuzzy controllers: A transportation application, In Proc. 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'96), New Orleans, USA, pp. 674-680.
 8. Lee, S. C. and E. T. Lee. 1974. Fuzzy Sets and Neural Networks, *Journal of Cybernetics*, 4(2):83-103.
 9. Jang, J-S. Roger. 1993. ANFIS: Adaptive Network-