پنجمین کنفرانس سیستمهای فازی ایران
هفدهم الی نوزدهم شهریورماه ۱۳۸۳

کاربرد منطق فازی در طراحی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت

مرتضی منتظری[۱] و مجید صفرآبادی[۲]
آزمایشگاه شبیه‌سازی وکنترل سیستمها، دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
Montazeri@iust.ac.ir

چکیده

موتورهای توربین گاز جهت کارکرد مطلوب به یک سیستم کنترل نیاز دارند تا دبی سوخت را به عنوان منبع انرژی اولیه بر اساس نیاز موتور تنظیم نماید. علاوه بر این سیستم کنترل باید از رسیدن محدوده عملکردی موتور به شرایط بحرانی نظیر ماکزیمم دمای ورود به توربین و ناپایداری جریان جلوگیری کند. در این مقاله طراحی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت با استفاده از روش منطق فازی ارائه شده است. ابتدا به مدلسازی توربین گاز در حالتهای پایا و گذرا پرداخته شده است. در ادامه با شبیه‌سازی کامپیوتری، عملکرد موتور در این دو حالت بررسی گردیده است و نتایج شبیه‌سازی حالت پایا با نتایج آزمایش مقایسه شده است. آنگاه بر اساس مدل غیر خطی موتور، کنترلر فازی جهت تعیین میزان دبی سوخت در شرایط مختلف کاری طراحی شده است. نهایتاً به منظور بررسی تاثیر کنترلر بر پارامترهای عملکردی موتور، شبیه‌سازی موتور توربوجت با سیستم کنترل انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: توربین گاز ـ شبیه‌سازی ـ منطق فازی ـ کنترل سوخت ـ موتور توربوجت

مقدمه

موتورهای توربین گاز نقش مهمی در توسعه قابلیتهای پروازی هواپیماهای مدرن امروزی دارند[۱]. نقش اصلی سیستمهای کنترل، تامین سوخت مورد نیاز، مطابق با فازهای پروازی و سایر نیازمندیها از جمله توان خروجی می‌باشد[۲]. مساله مهم در توربینهای گاز، میزان پایداری اجزاء آنهاست، چرا که ناپایداری دینامیکی و گذرا می‌تواند محدوده عملکرد اجزای موتور را در جهت تجاوز از ناحیه کاری ایمن سوق دهد[۱]. این امر می‌تواند موجب از بین رفتن تراست مطلوب و عدم کنترل پذیری موتور شود و یا اینکه موتور به علت تنشهای حرارتی بالا و یا سرعت غیر مجاز دچار آسیب گردد. لیکن طراحی یک سیستم کنترل، جهت عملکرد مطلوب، مورد نیاز است. طراحی یک سیستم کنترل مناسب نیاز به درک عمیقی از رفتار حالتهای پایا(Steady State) و گذرای (Transient) موتور دارد، چرا که دینامیک موتور نسبت به زمان و شرایط مبنا تغییر می‌کند[۳]. کنترلر طراحی شده باید علاوه بر تامین تراست مورد نیاز، از ناپایداری جریان و وقوع پدیده هایی نظیر افزایش بیش از حد دما و سرعت مجاز جلوگیری کند. از آنجاییکه دبی سوخت ورودی به موتور، بر تمام پارامترهای عملکردی آن تاثیر دارد، یکی از روشهای کنترل موتورهای توربوجت، طراحی کنترلر سوخت می‌باشد.

۱- هیأت علمی
۲- محقق ارشد

روشهای متعددی برای طراحی سیستم کنترل سوخت وجود دارد که از نظر کلی به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. جهت استفاده از روشهای خطی، سیستم باید در نقاط متعدد کاری خطی شود که نتیجه آن یک دسته از کنترلرهای خطی است. این کنترلرها فقط در همسایگی نقاطی که سیستم حول آنها خطی شده است، کارآیی مناسبی دارند و لذا بهتر است برای سیستمهای غیرخطی از روشهای غیرخطی استفاده شود.

در این مقاله طراحی سیستم کنترل فازی سوخت موتور توربوجت ارائه شده است. منطق فازی روش مناسبی جهت کنترل سیستمهای غیر خطی و سیستمهایی که مدل آنها دارای عدم قطعیت است، می‌باشد. ابتدا موتور در حالتهای پایا و گذرا مدلسازی و سپس با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک (SIMULINK) مورد شبیه سازی قرار گرفته است. آنگاه با در نظر گرفتن مسائل مربوط به پایداری، محدودیتهای فیزیکی و عملکرد مطلوب موتور، به طراحی کنترلر فازی پرداخته شده است. نهایتاً به منظور بررسی عملکرد موتور، شبیه‌سازی موتور توربوجت با حضور کنترلر فازی انجام شده است. در پایان با مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی سیستم حلقه باز و نتایج شبیه‌سازی موتور با سیستم کنترل، قابلیت روش منطق فازی در طراحی سیستم کنترل سوخت مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل سازی و شبیه سازی عملکرد پایا و گذرای موتور

بخش اصلی یک موتور توربین گاز، مولد گاز است که اجزای اصلی آن کمپرسور، محفظه احتراق و توربین می‌باشد. در این قسمت با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر اجزاء سیستم و در نظر گرفتن هماهنگی اجزاء از نظر کار و جریان در حالتهای پایا و گذرا مدل ریاضی سیستم حاصل شده است.

مدلسازی حالت پایا از نقطه طراحی موتور که همه پارامترهای آن معلوم هستند، شروع می‌شود. در این حالت کار توربین و کمپرسور با یکدیگر برابر است و جریان گاز ورود به توربین برابر با مجموع دبی هوای کمپرسور و دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق می‌باشد. در ضمن جهت ساده سازی معادلات از افت فشار در دهانه ورودی و خروجی و انتقال حرارت از طریق دیواره ها صرف نظر شده است. در عملکرد پایا و گذرای موتور، تغییرات نسبت فشار کمپرسور و راندمان آیزنتروپیک آن نسبت به دبی هوای تصحیح شده از مشخصه های عمومی کمپرسور حاصل می گردد. در حالت پایا فرض می‌شود که توربین در حالت خفگی (Choke) کار می‌کند و مقدار دبی تصحیح شده عبوری از آن، با تغییرات نسبت فشار توربین ثابت می‌ماند[۲]. همچنین جهت محاسبه افت فشار در محفظه احتراق از یک رابطه عمومی به نام معادله Bragg به فرم زیر استفاده گردیده است[۵]:

$$\Delta P = \left[\frac{0.01621 \dot{m}_f \sqrt{T_3}}{A_{ft} P_c}\right]^2 P_3 \qquad (۱)$$

که P_3 و T_3 به ترتیب فشار و دمای خروجی از کمپرسور، A_{ft} سطح لاینر، $\dot{m}_f$ دبی سوخت و P_c نسبت فشار کمپرسور می‌باشند.

جهت محاسبه نقاط عملکردی پایای موتور، باید در هر سرعت دورانی نقطه تعادلی روی منحنی مشخصه کمپرسور حاصل شود که در آن نقطه، قدرت خالص خروجی صفر باشد. جهت یافتن نقطه تعادل، ابتدا از روی منحنی مشخصه کمپرسور سرعتی انتخاب شده و با در نظر گرفتن یک نسبت فشار حدسی، دبی هوا بدست می‌آید. با داشتن نسبت فشار و راندمان کمپرسور نسبت دمای کمپرسور قابل محاسبه خواهد بود. با فرض برابری کار توربین و کمپرسور، دبی سوخت معین می‌شود. با استفاده از مشخصه توربین و فرض کارکرد آن در حالت خفگی (Choke) و در نظر گرفتن افت فشار در محفظه احتراق، یک نسبت فشار جدید برای کمپرسور بدست می‌آید. در صورت برابر بودن این مقدار با نسبت فشار حدسی نقطه تعادل مورد نظر حاصل می‌گردد. در غیر این صورت نسبت فشار دیگری حدس زده شده و این رویه تکرار می‌شود. در نهایت با تکرار این مراحل برای سرعتهای دیگر، خط تعادل پایای موتور رسم می‌شود[۴]. شکل (۱) مدل شبیه سازی موتور را در حالت پایا نشان می‌دهد.

در حالت گذرا پارامترهای عملکردی موتور با زمان تغییر می‌کنند. اگر موتور توربوجت در یک نقطه پایا در حال کار باشد و سیستم کنترل، دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق را افزایش دهد، قدرت خروجی توربین افزایش می‌یابد. بنابراین یک گشتاور اضافی بوجود آمده که سبب شتاب محور موتور می‌گردد. این شتاب تا زمانی ادامه دارد که یک نقطه پایای جدید با مقدار دبی سوخت موجود مطابقت داشته باشد. از طرف دیگر کاهش دبی سوخت شتاب منفی ایجاد می‌کند و لذا به علت ایجاد توان منفی، پاسخ گذرای موتور در جهت کاهش سرعت است. بر خلاف حالت پایا، در حالت گذرا محاسبات فقط برای ایجاد نیازمندیهای تطابق جریان است نه کار یا توان. به عبارت دیگر اختلاف کار توربین و کمپرسور شتاب مثبت یا منفی موتور را سبب می‌شود که شتاب محور موتور و گشتاور اضافی توسط قانون دوم نیوتن به هم مربوطند. بنابراین در حالت گذرا، معادله دینامیکی روتور نیز باید در نظر گرفته شود. در شکل (۲) مدل شبیه‌سازی موتور در حالت گذرا آمده است.

طراحی سیستم کنترل سوخت

با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عملکرد موتور در حالتهای پایا و گذرا ملاحظه می شود که دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق، یک پارامتر کنترلی فراگیر (full range) است که بر تمام مشخصه‌های عملکردی موتور تاثیر می‌گذارد. لذا تمام پارامترهای عملکردی موتور نظیر سرعت دورانی، نسبت فشار کمپرسور، دمای ورود به توربین و تراست متاثر از تغییرات میزان سوخت می‌باشد که این مقدار توسط سیستم کنترل سوخت تعیین می‌شود. بنابراین مدل غیرخطی موتور به صورت آنچه که در شکل (۳) آورده شده است، می‌باشد. سیستم نشان داده شده در شکل (۳) حلقه باز است و لذا نیاز به یک کنترلر دارد تا سیستم به صورت حلقه بسته درآید. این سیستم کنترل باید با توجه به پارامترهای خروجی مطلوب، دبی سوخت مورد نیاز را تامین کرده و در ضمن از بوجود آمدن ناپایداری جریان در کمپرسور، سرعتها و تنشهای بحرانی و همچنین خاموشی یا خفگی شعله جلوگیری کند. دیاگرام سیستم کنترلی در نظر گرفته شده به صورت شکل(۴) درمی‌آید.

طراحی کنترلر سوخت با استفاده از روش منطق فازی

یکی از روشهای مناسب برای سیستمهای غیرخطی، منطق فازی است. کنترل فازی بیشتر در مواقعی استفاده می شود که به علت پیچیدگی سیستم مورد نظر، بدست آوردن مدل ریاضی سیستم دشوار و یا حتی غیر ممکن باشد و یا اینکه سیستم غیرخطی است. مزیت این روش قابلیت مانور در انتخاب تعداد و نوع توابع عضویت، تعریف قوانین فازی مختلف و سهولت استفاده از آن است. لازمه طراحی یک سیستم فازی مطلوب، تعریف توابع عضویت و قواعد مناسب است که این امر نیاز به شناخت صحیح و دقیق از فیزیک سیستم مورد مطالعه، تجربیات و مشاهدات قبلی دارد. امروزه با استفاده از الگوریتمهای ژنتیکی با تغییر توابع عضویت و قوانین فازی، به بهینه‌سازی کنترلر طراحی شده پرداخته می‌شود[۴].

در بیشتر موارد خطای خروجی یعنی اختلاف بین خروجی فرایند و سیگنال مرجع، ورودی سیستم فازی می‌باشد. ورودی دیگر سیستم فازی می‌تواند تغییرات یا مشتق این کمیت باشد.

برای سیستم مورد مطالعه دو سیستم فازی طراحی شده است، یکی سیستم فازی پایا که تعیین کننده دبی سوخت حالت پایا جهت رسیدن به نقطه تعادل جدید می‌باشد و دیگری کنترلر فازی گذرا که دبی سوخت گذرا را مشخص می‌کند. سیستم فازی پایا در حقیقت یک mapping فازی است و با توجه به نتایج شبیه‌سازی پایای موتور طراحی می‌گردد. جهت طراحی سیستم فازی پایا دور خواسته شده به عنوان ورودی می‌باشد. نقش اصلی در کنترل بر عهده کنترلر فازی گذرا است، که میزان تغییرات سوخت را نسبت به حالت پایای آن تعیین می‌کند. برای این کنترلر، خطای سرعت روتور (یعنی اختلاف دور خواسته شده توسط فرمان تراتل و دور موجود) به عنوان ورودی اول می‌باشد. ورودی دوم این کنترلر مشتق یا تغییرات ورودی اول نسبت به زمان است. کنترلر فازی گذرا معین می‌کند که برای یک اختلاف دور معین، دبی سوخت چگونه باید تغییر کند. دبی سوخت ورودی به موتور از تاثیر متقابل این دو سیستم فازی حاصل می گردد.

برای ورودیها و خروجیهای یک سیستم کنترل فازی توابع عضویت مختلفی می توان در نظر گرفت. با تغییر دادن نوع و تعداد این توابع می‌توان پاسخهای مختلفی برای عملکرد گذرای موتور بدست آورد. همچنین با تغییر تعداد توابع عضویت، قوانین فازی نیز باید تغییر کند. در این مقاله تاثیر این پارامترها هم در نظر گرفته شده است. شکلهای (۵)و(۶)و(۷) نمونه‌ای از توابع عضویت در نظر گرفته شده را نشان می‌دهند. همچنین شکل (۸) دبی سوخت گذرای ورودی را بر حسب دو ورودی کنترلر فازی گذرا نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی عملکرد گذرای موتور با در نظر گرفتن کنترلر فازی

بعد از طراحی کنترلر فازی، بررسی تاثیر پارامترهای کنترلر بر عملکرد موتور دارای اهمیت است. پس لازم است که موتور با حضور کنترلر شبیه‌سازی شود. این مدل شبیه حالت گذراست، با این تفاوت که در این حالت به علت وجود کنترلر، سیستم حلقه بسته است. ورودی سیستم بر طبق فرمان تراتل توسط خلبان تعیین می‌شود. مثلاً در حالتی که موتور شتاب زیاد می‌گیرد و زمان شتابگیری کوتاه است (حالتfull throttle)، ورودی سیستم به صورت تابع پله مدل می‌شود. بنابراین در لحظات اولیه شتابگیری، کنترلر فازی پایا تغییرات زیادی درمیزان دبی سوخت به وجود می‌آورد که ممکن است باعث ناپایداری گردد، ولی با حضور کنترلر فازی گذرا ، مقدار دبی سوخت تعدیل شده و در نتیجه عملکرد موتور بهینه می‌گردد. همچنین برای در نظر گرفتن دینامیک سیستم کنترل سوخت (تاخیر زمانی) از یک تابع انتگرالی مرتبه اول به طور تقریبی استفاده شده است. در نتیجه با شبیه‌سازی موتور و سیستم کنترل آن، عملکرد گذرای موتور رسم شده و این منحنی با خط سرج موتور مقایسه می‌شود. با تغییر دادن توابع عضویت تعریف شده و قوانین فازی و تکرار برنامه شبیه‌سازی سعی می‌شود تا عملکرد قابل قبولی برای موتور بدست آید. با این کار می‌توان کنترلر مناسب جهت عملکرد بهینه موتور را بدست آورد. شکل (۹) مدل شبیه سازی موتور را با حضور کنترلرهای فازی پایا و گذرا نشان می‌دهد.

تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد موتور توربوجت

مدل بدست آمده با استفاده از نرم افزار Matlab و جعبه افزار Simulink برای یک موتور جت شبیه سازی شده است. نتایج مدلسازی و شبیه‌سازی موتور در شکلهای (۱۰) و (۱۱) آمده است. در شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی پایا با نتایج تست، مقایسه شده است. شکل (۱۱) عملکرد پایا و گذرای موتور را همراه با مشخصه های عمومی کمپرسور و خط سرج نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود در حالت پایا با افزایش سرعت دورانی روتور، محدوده امنیت کاهش یافته و سبب افزایش احتمال ناپایداری می‌گردد. همچنین در حالت گذرا با افزایش دبی سوخت، عملکرد گذرای موتور از خط پایا دور شده و در شرایط بحرانی می‌تواند باعث بوجود آمدن پدیده سرج گردد.

شکلهای (۱۲) الی (۱۵) پارامترهای عملکردی موتور نظیر نسبت فشار کمپرسور، دبی هوای ورودی به کمپرسور،سرعت دورانی روتور و دمای گازورود به توربین را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نتایج به ازای ورودی پله و یا همان حالت تراتل کامل به دست آمده‌اند که یکی از شرایط بحرانی برای موتور است. همانطور که مشاهده می‌شود، با حضور کنترلر فازی، تغییرات پارامترهای عملکردی موتور از فرم نسبتاً مناسبی برخوردار است، گرچه شرایط کاری موتور بحرانی است. بنابراین با وجود کنترلر فازی، برای ورودی پله تغییرات دبی سوخت به صورتی است که موتور دارای عملکرد مناسبی باشد.

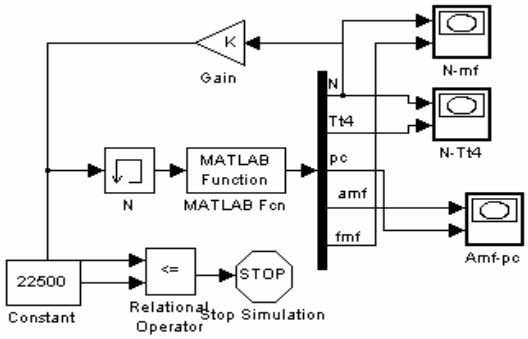
در شکلهای (۱۶) و (۱۷) عملکرد موتور و محدوده استال در دو حالت حلقه باز و حلقه بسته (با حضورکنترلر فازی) برای حالت تراتل کامل، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در غیاب کنترلر فازی نسبت فشار کمپرسور یکباره افزایش می‌یابد که منجر به صفر شدن محدوده استال و در نتیجه ناپایداری در سرعتهای پایین می‌گردد. نتایج شبیه سازی سیستم کنترل شده، نمایانگر افزایش تدریجی نسبت فشار کمپرسور است که در این حالت کمترین محدوده ایمن حدود 13% در سرعتهای بالا (حدود 94% سرعت ماکزیمم) می‌باشد. بنابراین ملاحظه می شود که عملکرد موتور با حضور کنترلر بهبود می‌یابد.

شکل (۱۸) تاثیر نوع توابع عضویت را در عملکرد گذرای موتور نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با انتخاب توابع مثلثی،تابع نوع S و تابع نوع گوسی موتور دارای عملکرد مناسبی است، در حالیکه انتخاب تابع نوع ذوزنقه نتیجه متفاوتی را نسبت به سایر توابع نشان می‌دهد.

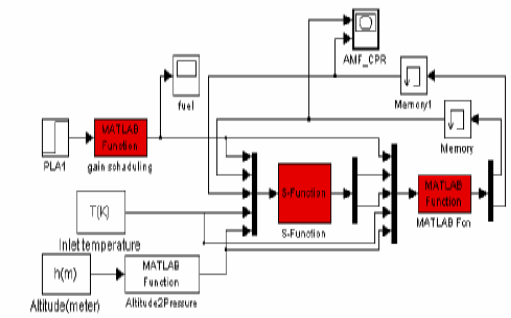
شکل (۱۹) تاثیر تعداد توابع عضویت و به تبع آن قوانین فازی را در عملکرد موتور نشان می‌دهد. با توجه به‌این شکل، با افزایش تعداد توابع عضویت و قوانین فازی، نوسانات موجود در عملکرد موتور کمتر شده تا آنجا که برای تعداد بیشتر از ۱۵ تابع عضویت، این نوسانات تقریباً از بین می‌روند. با بررسی سایر نتایج به نظر می‌رسد که تابع گوسی و قوانین فازی مربوط به آن، می‌تواند یکی از کنترلرهای فازی مناسب را تشکیل دهد.

نتیجه‌گیری

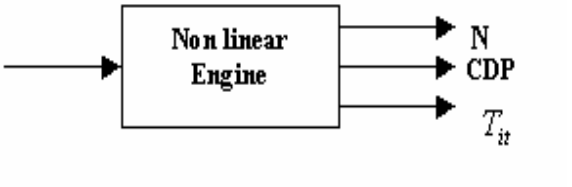
در این مقاله طراحی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت با استفاده از روش منطق فازی ارائه شد. در ابتدا نتایج شبیه‌سازی حالتهای پایا و گذرا نشان داد که دبی سوخت یک پارامتر کنترلی فراگیر (full range) است که بر تمام مشخصات عملکردی موتور تاثیر می‌گذارد. بنابراین جهت کنترل دبی سوخت، یک سیستم حلقه بسته در نظر گرفته شده که میزان دبی سوخت را بر حسب زمان تعیین می‌کند. در این سیستم از خطای سرعت روتور و مشتق آن به عنوان سیگنال ورودیهای کنترلر فازی استفاده گردید. در ادامه جهت بررسی تاثیر پارامترهای کنترلر بر عملکرد موتور، شبیه سازی کامپیوتری انجام گرفت. با تغییر توابع عضویت و قوانین فازی و اجرای مجدد برنامه شبیه‌سازی، کنترلر فازی مناسب انتخاب گردید. شبیه سازی نشان داد که با حضور کنترلر فازی طراحی شده، موتور همواره در یک محدوده امن قرار می‌گیرد که امر بیانگر قابلیت روش منطق فازی در طراحی کنترلر است.



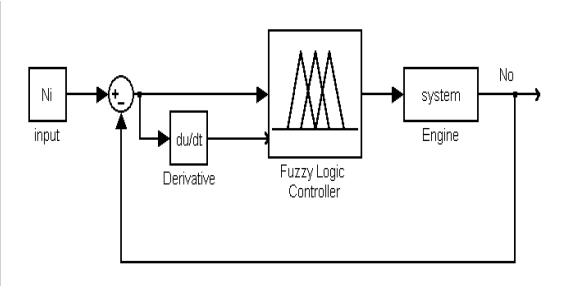
شکل ۱- مدل شبیه‌سازی موتور در حالت پایا



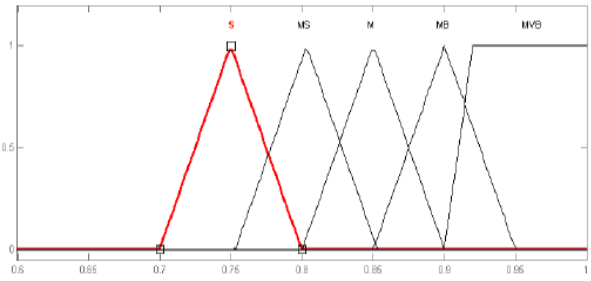
شکل ۲- مدل شبیه‌سازی موتور در حالت گذرا



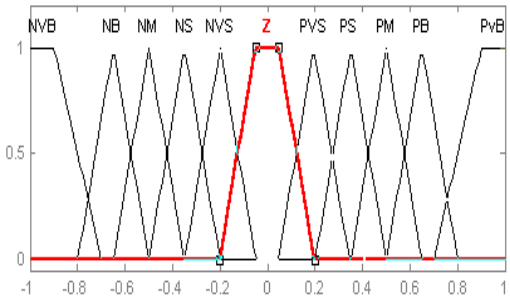
شکل۳ - مدل غیرخطی در نظر گرفته شده برای موتور



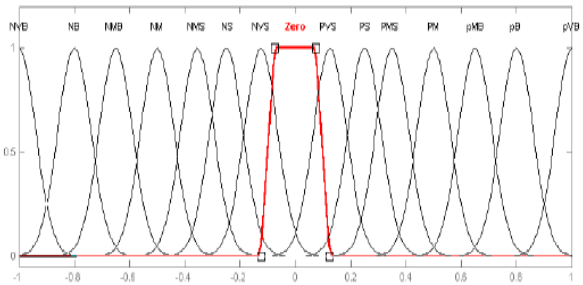
شکل ۴- مدل درنظر گرفته شده برای موتور و سیستم کنترل فازی

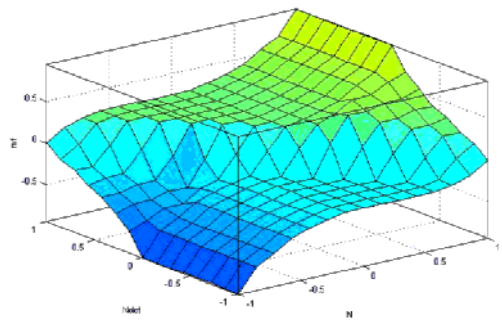


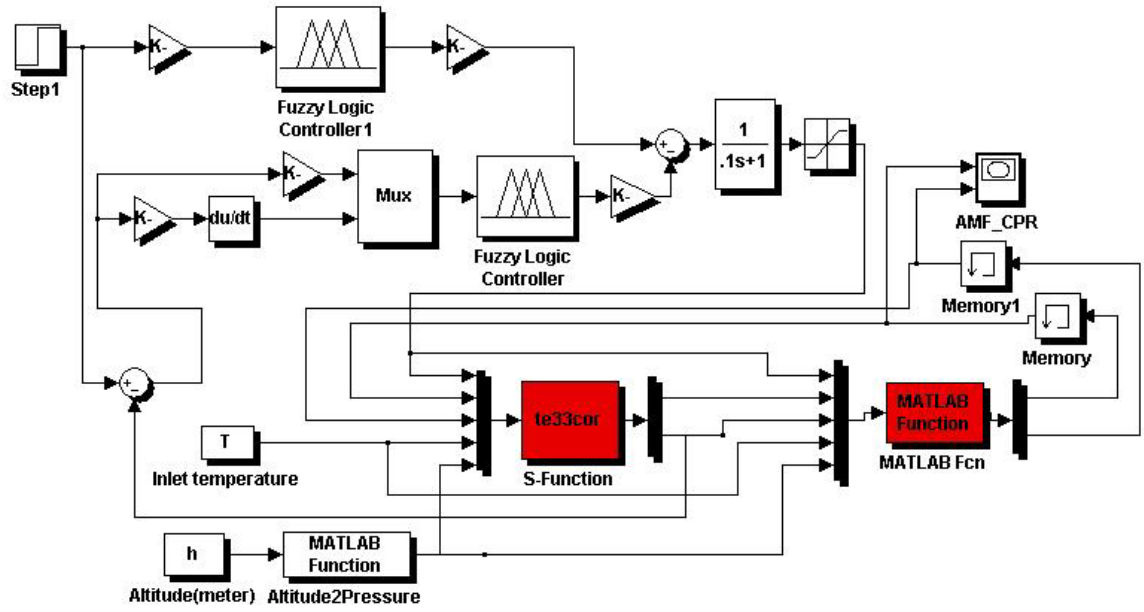
شکل ۵- تابع عضویت درنظر گرفته شده از نوع مثلثی درطراحی کنترلر فازی پایا



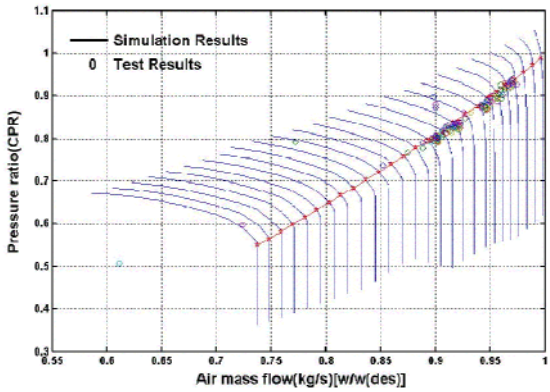
شکل ۶- تابع عضویت درنظر گرفته شده از نوع مثلثی در طراحی کنترلر فازی گذرا



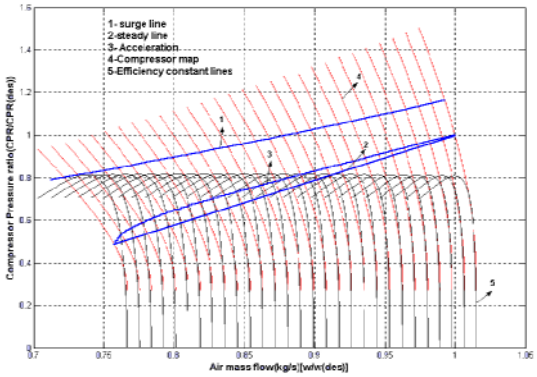




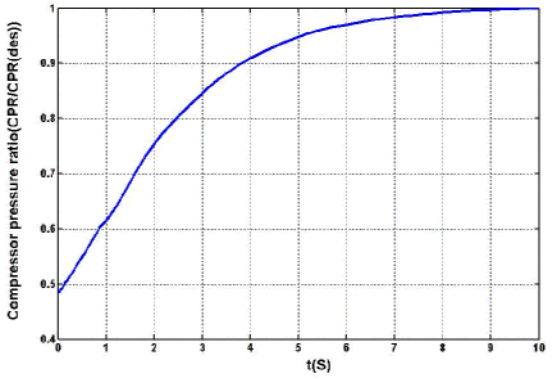
شکل ۹- مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده برای موتور با حضور سیستم فازی پایا و کنترلر فازی گذرا



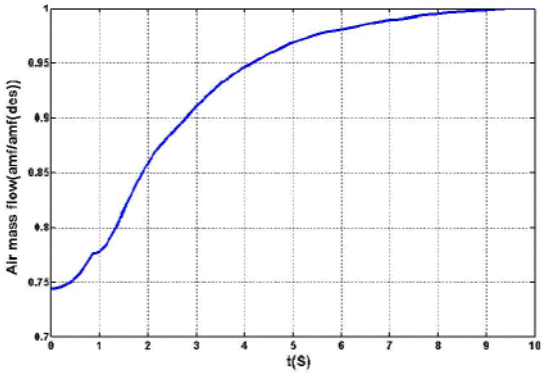
شکل ۱۰- مقایسه نتایج تست با نتایج شبیه‌سازی حالت پایا



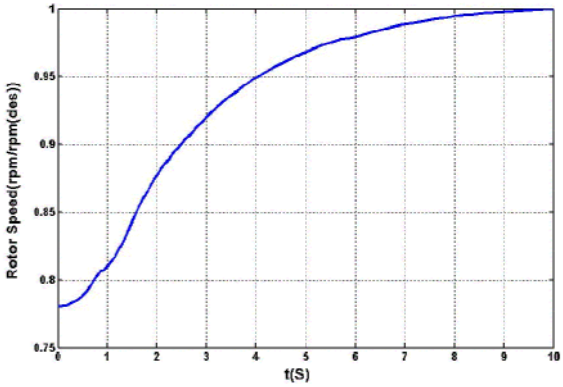
شکل ۱۱- عملکرد پایا و گذرای موتور همراه با خط سرج و مشخصه های عمومی کمپرسور حاصل از شبیه‌سازی



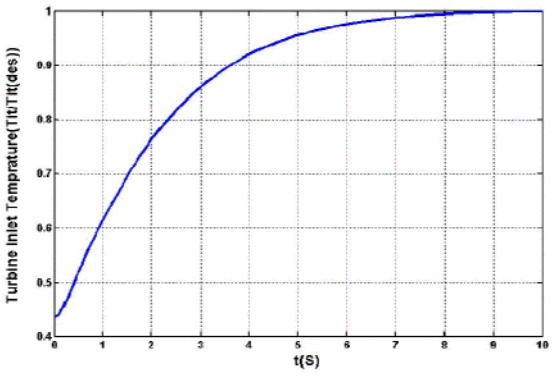
شکل ۱۲- تغییرات نسبت فشار کمپرسور برای ورودی پله (شرایط تراتل کامل)



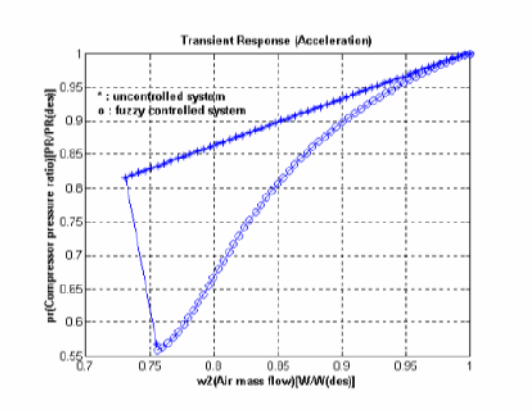
شکل ۱۳- دبی هوای ورودی به کمپرسور



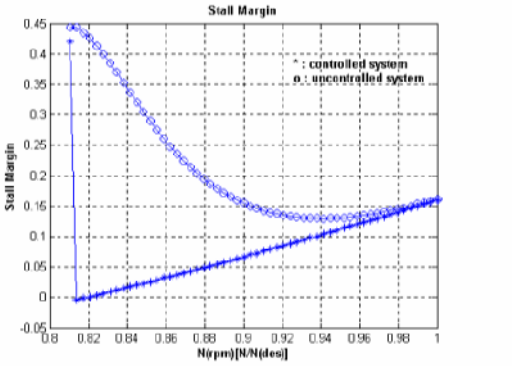
شکل ۱۴- سرعت دورانی روتور



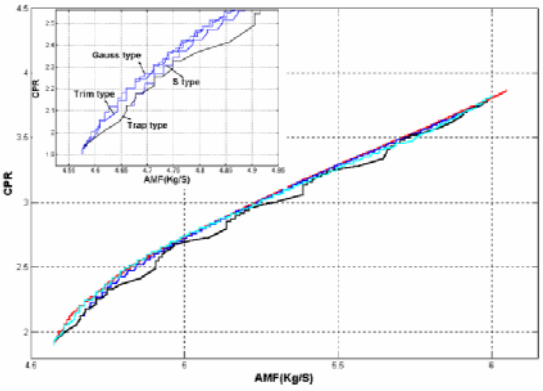
شکل ۱۵- دمای گاز ورودی به توربین



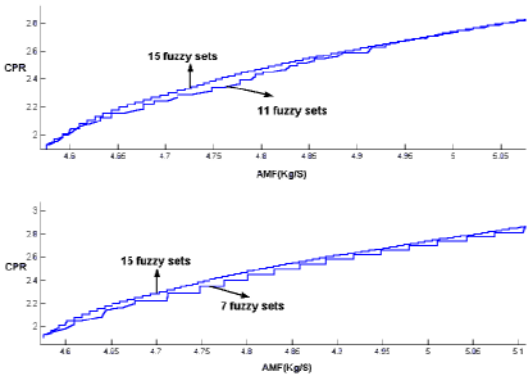
شکل ۱۶- مقایسه عملکرد موتور در دو حالت حلقه باز و حلقه بسته برای شرایط full throttle



شکل ۱۷- مقایسه محدوده استال برای سیستم حلقه باز و سیستم کنترل شده فازی



شکل ۱۸- تأثیر توابع عضویت مختلف برای کنترلر فازی گذرا در عملکرد گذرای موتور



شکل ۱۹- تأثیر تعداد توابع عضویت برای کنترلر فازی گذرا در عملکرد گذرای موتور

مراجع

[1] Doug Garrard., "The Aerodynamic Turbine Engine Code for the Analysis of Transient and Dynamic Gas Turbine ngine System Operations, " ASME 96-GT-193.
[2] Montazeri Gh.M., and Mojallal A.S., "Modeling and Simulationofm of Gas Engine Performance." MESM 2002, Sharjah.
[3] Cohen H., Rogers G.F.C., and Saravanamuttoo I.H., Gas Turbine Theory,4 th edition,1996.
[4] Bica B., Acat G., Cipperfield A. and Fleming P.J., "Multivariable Design of a Fuzzy Controller for a Gas Turbine Aero-Engine," International Conference on CONTROL,1998.
[5] Sawyer J.W., Gas Turbine Engineering Handbook, 3rd edition, Tubomachinery International Publication,1985.
[6] Mattingly jak.D., Elements of Gas Turbine Propulsion, Mc Graw – Hill, 1996.
[7] Walsh Philip P., Paul Fletcher., Gas Turbine Performance, Blackwell Science, 1999.
[8] McGlone M.E., "Transition of Technology Base for Advanced Aircraft Gas Turbine Control Systems," Journal of Engineerhng for Gas Turbines and Power, Vol. 120, 1998, pp. 437-441.
[9] Crosa G., Pittaluga F., Trucco A., Beltrami F., Torelli A., and Traverso F., "Heavy Duty Gas Turbine plant Aerothermodynamic Simulation Using Simulink," Journal of Engineerhng for Gas Turbines and Power, Vol. 120, 1998, pp. 550-556.
[10] Alain Garassino., Snecma., "An Advanced Control System for Turbofan Engine: Multivariabl Control and Fuzzy Logic(Application to the M88-2 Engine)," ASME 95-GT-344.
[11] Valceres V.R Silva., Wael Khatib., and Peter Fleming., "Variable Complexity Modelling for Evolutionary Gas Turbine Control Design," International Conference on CONTROL, 1998.