



طراحی شیر کنترل جریان دورانی جدید مجهز به جبران کننده فشار برای سیستم سوخت نوعی موتور توربوجت

سیف الدین مجلل آغبلاغ، جاماسب پیرکندی^{*}، مصطفی محمودی، مهدی چهرمی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲ مهر ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۴ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۳ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۹ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

سیستم اندازه‌گیری سوخت
کنترل سوخت
موتور جت
شیر کنترل جریان
شیر اندازه‌گیری سوخت

چکیده: در این مقاله شیر کنترل جریان دورانی جدید با ساختار بادامک-نازل، مجهز به جبران کننده فشار با تحریک الکترونیکی ارائه شده است. این مجموعه در واحد کنترل سوخت موتور توربینی نصب شده و وظیفه کنترل دقیق سوخت را بر عهده دارد. تحریک این شیر به صورت مستقیم توسط محرکه الکترونیکی از نوع سروموتور انجام می‌شود. هدف از این طرح، ارتقاء قابلیت‌های عملکردی سامانه سوخت و تغییر ماموریت موتور می‌باشد. انتخاب محرکه دورانی و طراحی شیر کنترل جریان دورانی، اتصال مستقیم محرکه به بادامک و نیز طراحی هندسه خاص مقطع تنظیم سوخت از نوآوری‌های طرح می‌باشد. تحریک مستقیم شیر کنترل جریان، موجب کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی تعداد قطعات و سیکی مجموعه و نیز کاهش هزینه‌های ساخت تا ۲۰ درصد شده است. افزایش دقت اندازه‌گیری سوخت، موجب افزایش دقت کنترلی تا دو برابر شده است. مقطع اندازه‌گیری سوخت به صورت سطح جانبی یک استوانه با ارتفاع متغیر می‌باشد. جهت دستیابی به پارامترهای طراحی بهینه، شبیه سازی ریاضی سیستم انجام شده است. پس از ساخت نمونه ها، عملکرد مجموعه روی استند مخصوص، آزمایش شده و جهت اعتبارسنجی مدل ریاضی سیستم، نتایج آزمایش با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. وجود خطای حداکثر ۵ درصد بین نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایش نشان دهنده دقت مدل ارائه شده می‌باشد.

۱- مقدمه

اهرم‌بندی‌ها^۱ و بادامک‌های سه‌بعدی^۲ و غیره هستند. در سیستم‌های کنترل سوخت جدید و امروزی واحد محاسبه کاملاً الکترونیکی بوده و به نام بخش کنترل الکترونیکی^۳ و یا فادک^۴ معروف هستند. واحد اندازه‌گیری سوخت با المان‌هایی مانند محرکه، شیر کنترل جریان، شیر کنترل فشار، اریفیس‌های میرا کننده و محدود کننده، فیلترها و نازل‌های سوخت‌پاش، وظیفه اندازه‌گیری سوخت ورودی به آن (ارسالی از پمپ سوخت) و بازگرداندن سوخت اضافی به تانک سوخت را بر عهده دارد و در سیستم‌های کنترل امروزی نسبت به نمونه‌های قدیمی بهینه‌تر و کارآمدتر شده‌اند. سیستم‌های کنترل سوخت هیدرومکانیکی مرسوم در موتورهای توربینی به دلیل محدودیت‌هایی مانند تنظیمات پیچیده و متعدد و تعداد قطعات و وزن بالا و قابلیت اطمینان پایین، جای خود را به سیستم‌های کنترل الکترونیکی داده‌اند.

بهبود عملکرد و راندمان سیستم‌های کنترل هیدرومکانیکی و ساده‌سازی آن‌ها، رویکرد صنعت و فن‌آوری امروزی است که با کاهش تعداد قطعات، هزینه‌ها و قیمت ساخت آن‌ها همراه است. این روند با به‌کارگیری تجهیزات الکترونیکی و بهینه‌سازی بخش‌های هیدرومکانیکی سامانه‌های کنترلی

وظیفه سیستم‌های کنترل سوخت در موتورهای توربینی، تأمین و تنظیم مقدار دقیق سوخت مورد نیاز موتور در شرایط مختلف کارکردی آن بر اساس فرمان ورودی و شرایط کاری و محیطی موتور می‌باشد. سیستم‌های کنترل سوخت شامل چند بخش اصلی مانند پمپ سوخت برای تولید جریان لازم، بخش محاسبه جهت محاسبه مقدار سوخت مورد نیاز موتور بر اساس ورودی‌ها، واحد اندازه‌گیری سوخت جهت تنظیم و ارسال سوخت مورد نیاز موتور به محفظه احتراق و بازگرداندن سوخت اضافی به تانک سوخت و نازل‌های سوخت جهت پاشش مناسب سوخت در محفظه احتراق موتور می‌باشند (شکل ۱). واحد محاسبه با ارزیابی شرایط محیطی (دما و فشار محیط) و شرایط کاری موتور (پارامترهای عملکردی موتور) و نیز فرمان خلبان براساس قانون کنترلی مشخصی، محاسبه مقدار سوخت مورد نیاز موتور را انجام داده و این فرمان را به محرکه در بخش اندازه‌گیری سوخت ارسال می‌کند.

در سیستم‌های کنترل سوخت قدیمی واحد محاسبه به صورت هیدرومکانیکی بوده و شامل المان‌هایی مانند گاورنر^۵، دم یا خرطومی^۶،

- 3 Linkages
- 4 3D Cams
- 5 Electronic Control Unit
- 6 Full Authority Digital Electronic Control Unit
- 7 Orifice

- 1 Governor
- 2 Bellows

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jpirkandi@mut.ac.ir

طریق شیر کنارگذر به ورودی پمپ بر می‌گردد.

در راستای ارتقاء و تغییر کاربری موتورهای توربینی و با هدف تغییر طراحی و افزایش قابلیت‌های موتور و کنترل‌پذیر کردن آن‌ها، فعالیت‌های هدف‌داری در ایران و در قالب پروژه‌های دانشجویی و نیز پروژه‌های همکاری مشترک بین دانشگاه و صنعت در مقاطع کارشناسی ارشد و دکترا، بین سال‌های ۱۹۹۹ تا سال ۲۰۱۲ میلادی توسط دکتر مرتضی منتظری و همکاران [۸-۶] در دانشگاه علم و صنعت ایران، انجام گردید. در فاز اول این فعالیت‌ها امکان‌سنجی، شناسایی و همچنین مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های موتور و سیستم کنترل سوخت آن به عنوان پیش‌نیاز و مقدمه‌ای برای طراحی سیستم کنترل سوخت جدید انجام گردید. در فاز بعدی ایده‌پردازی‌ها و طراحی‌های مفهومی مورد بررسی قرار گرفته و طرح‌های مختلفی برای سیستم کنترل سوخت موتورهای توربینی ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

در سال ۲۰۰۷ شرکت مایکروتوربو [۹] از یک شیر سروو^۱ به عنوان شیر کنترل جریان در کنار یک شیر کنترل فشار در سیستم کنترل سوخت نوعی موتور توربینی ارائه نمود. دقت کنترلی بالا در جریان سوخت بالا و محرکه الکترونیکی دقیق و سرخود از مزایای این سیستم می‌باشد. البته هزینه بالای تأمین شیر سروو، وزن بالا و ابعاد بزرگ، دقت کنترلی پایین در جریان سوخت پایین (ارتفاعات بالا) از عیوب آن می‌باشد.

در سال ۲۰۱۰ شرکت مایکروتوربو [۹] در راستای ارتقاء سیستم‌های کنترل سوخت موتورهای توربینی در نوعی موتور مینی توربوجت، سیستم کنترل سوخت الکترونیکی جدیدی ارائه نمود که در آن به جای استفاده از شیرهای کنترل جریان و کنترل فشار، از نوعی پمپ سوخت دنده‌ای با درایور^۲ الکترونیکی استفاده نمود که با تغییر دور پمپ، مقدار جریان سوخت ورودی به موتور بر اساس فرمان ترا^۳ تغییر و تنظیم می‌گردید.

در سال ۲۰۱۱، جونز روبرت و سالیهال [۱۰] نوعی شیر کنترل جریان دورانی برای استفاده در سیستم کنترل سوخت موتورهای توربینی ارائه نمودند. دورانی بودن شیر کنترل جریان در این طرح و نیز طرح خاص مقطع عبور سوخت از مزایای آن می‌باشد. چرا که تغییرات دبی سوخت نسبت به فرمان ترا^۳ خطی بوده و کنترل سوخت با دقت بیشتری اتفاق می‌افتد. از عیوب این مجموعه می‌توان به مشکلات ساخت شیر کنترل جریان جهت آب‌بندی بین المان‌ها و هزینه‌های بالای ساخت اشاره نمود. استفاده از موتور پله‌ای^۴ که معمولاً دارای نویز^۵ می‌باشند برنامه کنترل را با مشکل مواجه کرده و چرخ‌دنده‌هایی که جهت افزایش گشتاور دورانی استفاده شده‌اند به دلیل لقی طبیعی که دارند دقت کنترلی را کاهش می‌دهند.

در سال ۲۰۱۵ مارک کلیمکو [۱۱] طرح جدیدی از ترکیب شیرهای

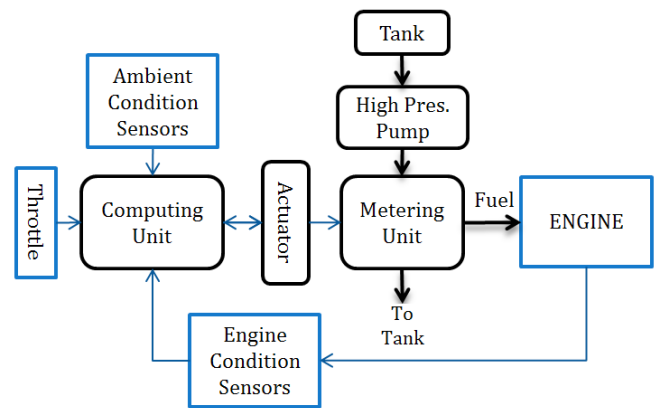


Fig. 1. A typical control system diagram in a turbine engine

شکل ۱: دیاگرام نوعی سیستم کنترل در موتور توربینی

موتورهای توربینی قابل دست‌یابی است [۲۰۱]. با توجه به نیاز روزافزون بهره‌برداران موتورهای توربینی در وسایل پرنده بدون سرنشین به ارتقاء و طراحی بهینه موتورهای توربینی برای مأموریت‌های جدید، فعالیت‌های مختلفی در دنیا انجام گرفته و در حال انجام است. در ادامه به بررسی فعالیت‌های انجام شده در این خصوص پرداخته شده است.

در سال ۱۹۹۰، کریک و گنوگان^۳ یک نوع شیر کنترل جریان سوخت مجهز به یک محرکه دیجیتال خطی به عنوان سیستم کنترل سوخت ساده و ارزان قیمت برای موتور توربو جت ای تی جی ۱۰۸۱ ارائه دادند. محرکه شیر توسط یک میکرو کامپیوتر کنترل می‌گردید. این مجموعه به دلیل نداشتن شیر جبران کننده فشار دقت کنترلی پایینی دارد.

در سال ۱۹۹۷ دو طرح مختلف از ترکیب شیرها برای سیستم تنظیم و اندازه‌گیری سوخت ارائه گردید. نمونه اول شامل یک شیر کنترل فشار دیافراگمی جهت ثابت نگه داشتن اختلاف فشار طرفین شیر کنترل جریان بود که این شیر توسط یک محرکه دیجیتال خطی تحریک می‌گردید. در نمونه دوم هر دو شیر کنترل جریان و کنترل فشار توسط دو محرکه مستقل دیجیتال خطی تحریک می‌شوند [۴]. مزیت مهم طرح اول سادگی و ارزان بودن آن و کارایی آن برای انجام مأموریت‌های سبک بوده ولی به دلیل استفاده از شیر دیافراگمی دارای پاسخ زمانی کند و دقت کنترلی پایین می‌باشد. طرح دوم دارای مزیت قابلیت اطمینان بالا به دلیل استفاده از دو محرکه مستقل بوده ولی از عیوب آن می‌توان به پیچیدگی واحد کنترل الکترونیکی آن برای کنترل دو محرکه به صورت همزمان و نیز هزینه‌های بالای ساخت و تعمیر و نگهداری آن اشاره نمود.

در سال ۲۰۰۳، فورد پیتر [۵] سیستم کنترل سوختی برای موتورهای توربینی ارائه کرد که شامل شیر افزایش فشار در مسیر سوخت اندازه‌گیری شده بود. این شیر حداقل فشار لازم جهت عملکرد صحیح سایر المان‌های کمکی سیستم کنترل را ایجاد می‌کرد. سوخت خروجی از پمپ در این سیستم به سه شاخه تقسیم می‌گردد. شاخه اول از طریق شیر کنترل جریان وارد شیر افزایشده فشار شده و به محفظه احتراق تحویل داده می‌شود. شاخه دوم جهت تحریک و راه اندازی محرکه‌ها استفاده می‌شود. و شاخه سوم از

- 1 Servo
- 2 Driver
- 3 Throttle
- 4 Stepper motor
- 5 Noise

کنترل جریان و کنترل فشار در نوعی سیستم کنترل سوخت به همراه مدل ریاضی آن ارائه نمود. در این طرح جریان خروجی پمپ در دو انشعاب وارد شیرهای کنترل جریان و کنترل فشار می‌گردد. شیر کنترل جریان به طور مستقیم به دسته گاز یا فرمان ورودی متصل بوده و در هر موقعیت فرمان ورودی، مقدار جریان سوخت مشخصی را وارد موتور می‌کند. ایده به کار رفته در این طرح استفاده از شیر کنترل فشار جدید جهت باز گرداندن سوخت اضافی به ورودی موتور می‌باشد. در این شیر علاوه بر فشار خروجی پمپ سوخت، فشار تنظیمی متغیری که توسط سیستم کنترل موتور اعمال می‌گردد سوخت اضافی خروجی از پمپ، به ورودی آن بازگردانده می‌شود.

در شیر تنظیم و کنترل جریان ارائه شده ضمن بهره‌مندی و استفاده از تجهیزات الکترونیکی، طراحی بهینه‌بخش هیدرومکانیکی نیز مورد نظر بوده‌است. محرکه الکترونیکی دورانی جهت تحریک مستقیم شیر به‌جای روش‌های معمول هیدرومکانیکی و یا الکتروهیدرومکانیکی استفاده شده‌است. به دلیل دورانی بودن محرکه و بادامک شیر کنترل جریان، کوپل مستقیم آن‌ها به هم امکان‌پذیر بوده و تعداد قطعات جهت اتصال محرکه به شیر کاهش می‌یابد. سیستم اندازه‌گیری سوخت ارائه شده در این مقاله بر اساس نیازمندی‌ها و اهداف مختلفی از جمله ارتقاء و بهبود عملکرد موتور در رژیم‌های کاری مختلف، تغییر کاربری سیستم‌های پیشران و استفاده از آن روی وسایل پرنده بدون سرنشین، پیاده سازی قوانین کنترلی مختلف روی موتور، کنترل محدوده‌های فیزیکی موتور و بومی‌سازی طراحی سیستم‌های کنترل سوخت الکتروهیدرومکانیکی با کارایی بالا و قیمت پائین و جهت استفاده روی موتورهای توربینی به عنوان سیستم پیشران وسایل پرنده طراحی و ساخته شده‌است. همچنین محرکه الکترونیکی دورانی جهت تحریک مستقیم واحد اندازه‌گیری سوخت به‌جای روش‌های مرسوم هیدرومکانیکی استفاده شده است. با توجه به طرح خاص سیستم تنظیم و کنترل جریان از نوع بادامک-نازل و به دلیل دورانی بودن محرکه، کوپل مستقیم آن‌ها به هم امکان‌پذیر بوده و تعداد قطعات جهت اتصال محرکه به تنظیم کننده سوخت و همچنین هزینه‌های ساخت این نوع طراحی کاهش می‌یابد. در این طرح به‌جای استفاده از اسلیو (سیلندر) و پلانجر (پیستون) که تقریباً در تمامی سیستم‌های اندازه‌گیری سوخت به کار می‌رود، یک بادامک با منحنی خاصی شبیه ماریچج ارشمیدس طراحی شده‌است که در مقابل یک نازل با قطر مشخص، دوران نموده و به دلیل انحنای خاص بادامک، در حین چرخش آن، فاصله سطح جانبی بادامک با نازل تغییر نموده و سوخت عبوری از نازل تغییر و تنظیم می‌گردد. شیرهای کنترل جریان از نوع پلانجر به دلیل فرایندهای پیچیده ساخت و مواد خاص هزینه‌های بالایی می‌طلبند و به دلیل سایش‌های در حین کار عمر کمتری داشته و به مرور زمان نشی‌های زیاد سوخت در آن‌ها دقت کنترلی را کاهش می‌دهد. در شیر جدید ارائه شده بادامک با نازل تماس نداشته و بنابراین سایش قطعات و کاهش عمر آن‌ها منتفی می‌گردد. این مجموعه طوری طراحی شده که در حین عملکرد سیستم و به دلیل تعادل نیرویی به وجود آمده در قطعات واحد

کنترل جریان، برای دوران بادامک به گشتاور بالا نیازی نیست. مقطع عبور سوخت در واحد کنترل جریان ارائه شده به صورت سطح جانبی استوانه‌ای است که طول یا ارتفاع آن تغییر نموده و مقدار سوخت اندازه‌گیری شده نیز تغییر می‌کند. طرح جدید ضمن افزایش دقت کنترلی، کاهش وزن و کاهش هزینه‌های ساخت را به همراه دارد. جهت دست‌یابی به پارامترهای بهینه طرح، شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی سیستم در شرایط پایا و گذرا استخراج شده‌است. جهت اعتبارسنجی مدل مجموعه نتایج آزمایش نمونه ساخته شده با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. این طرح جدید و بهینه، دارای مزایایی مانند دقت بالایی کنترلی در سیستم سوخت موتور و هزینه ساخت کمتر نسبت به نمونه‌های مشابه با حد اقل قطعات ممکن در حین سادگی و با عملکرد و راندمان مطلوب می‌باشد.

طراحی شیر کنترل جریان دورانی، انتخاب محرکه دورانی مناسب و کوپل مستقیم محرکه به بادامک شیر کنترل جریان و نیز طراحی هندسه خاص مقطع تنظیم سوخت بدون تماس فیزیکی اجزاء تنظیم سوخت (بادامک و نازل) از نوآوری‌های این طرح جدید می‌باشد. تحریک مستقیم شیر کنترل جریان به‌جای روش‌های مرسوم هیدرومکانیکی، موجب کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی تعداد قطعات و سبکی مجموعه و نیز کاهش هزینه‌های ساخت و آزمایش تا ۲۰ درصد شده است. افزایش دقت اندازه‌گیری سوخت در شیر کنترل جریان جدید، موجب افزایش دقت کنترلی نهایی تا دو برابر می‌گردد.

۲- تشریح عملکرد مجموعه

طرح‌واره واحد کنترل و اندازه‌گیری جریان سوخت پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. وظیفه این مجموعه کنترل مقدار جریان ورودی متناسب با موقعیت زاویه‌ای بادامک می‌باشد که توسط محرکه الکترونیکی تعیین می‌شود. این مجموعه سوخت وارد شده را به دو قسمت تقسیم می‌کند. قسمت اول، سوخت اندازه‌گیری شده و قسمت دوم سوخت کنارگذر یا سوخت اضافی می‌باشد. دوران بادامک واحد کنترل جریان باعث تغییرات فاصله سطح بادامک نسبت به نازل شده و مقدار سوخت خروجی متناسب با موقعیت قرارگیری بادامک می‌باشد. سوخت اضافی از طریق شیر کنترل فشار (جبران کننده فشار) و مسیر کنارگذر به تانک سوخت برمی‌گردد. بخش کنترل جریان مجموعه ارائه شده در واقع سطح جانبی استوانه با ارتفاع متغیر بوده و مقدار جریان عبوری از آن به دو عامل مهم سطح مقطع عبور سوخت و مقدار اختلاف فشار ورودی و خروجی بستگی دارد. کنترل سطح مقطع عبور جریان بوسیله محرکه الکترونیکی و بادامک قابل انجام است ولی کنترل اختلاف فشار طرفین آن توسط شیر جبران کننده فشار صورت می‌گیرد. این مجموعه طوری طراحی شده‌است که مقدار جریان سوخت خروجی از این بخش فقط به موقعیت زاویه‌ای بادامک بستگی داشته و تغییرات فشار در ورودی و خروجی مجموعه بادامک-نازل، تأثیری در مقدار جریان خروجی ندارد. به عبارتی دیگر با ثابت ماندن موقعیت بادامک، حتی با وجود افزایش جریان ورودی و یا فشار ورودی به مجموعه، مقدار جریان خروجی ثابت خواهد بود.

یافتن هندسه دقیق طرح، تغییر یابند. هدف از استخراج معادلات حاکم رسیدن به مدل ریاضی مناسب جهت بررسی عملکرد مجموعه و بررسی حساسیت سیستم و ارزیابی اثرات تغییرات پارامترهای طراحی مجموعه در عملکرد آن، بررسی پاسخ سیستم به ورودی‌های مختلف و در نهایت استخراج پارامترهای طراحی و هندسه نهایی مجموعه می‌باشد [۱۳ و ۱۴ و ۱۵]. رفتار دینامیکی این سیستم بر حسب معادلات جبری و معادلات دیفرانسیل توصیف می‌گردد. این معادلات بر اساس قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم مانند قانون بقای جرم و قوانین نیوتن حاصل می‌شود. مهم‌ترین بخش تحلیل در این مسئله، یافتن یک مدل ریاضی مناسب می‌باشد. در این بخش معادلات حاکم بر رفتار سیستم در شرایط مختلف ارائه شده و حل می‌گردند [۱۶ و ۱۷]. جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی مجموعه در شرایط عملکردی مختلف و موقعیت‌های مختلف بادامک، فرض می‌شود که در ورودی آن منبع تولید جریانی مانند پمپ قرار گرفته و در خروجی آن مقاومت هیدرولیکی (معادل نازل‌های پاشش سوخت) جهت افزایش فشار جریان وجود دارد. با توجه به ابعاد هندسی در نظر گرفته شده برای بادامک و نازل کنترل جریان و سایر المان‌های آن، و نیز با در نظر گرفتن مقدار حداکثر فشار و جریانی که مورد نیاز است، معادلات حاکم بر مجموعه استخراج شده و مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند. در شکل ۳ مدار هیدرولیکی مجموعه کنترل جریان به همراه ورودی‌ها و خروجی‌های لازم و نیز پارامترهای عملکردی آن نشان داده شده است.

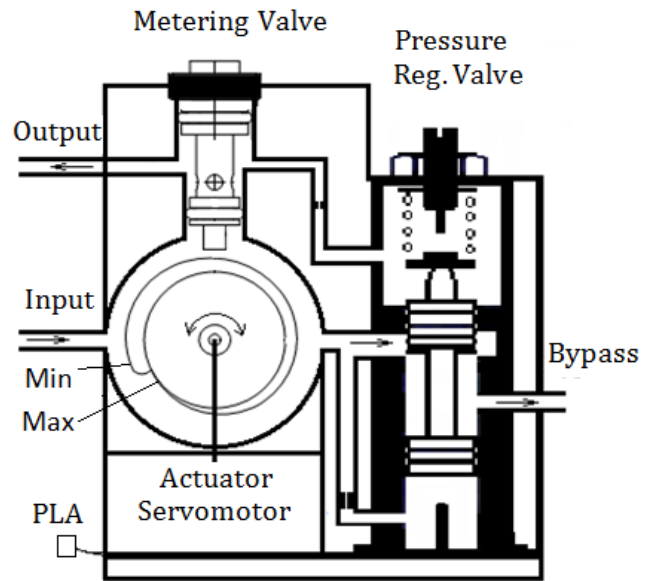


Fig. 2. Flow control valve schematic, equipped with pressure compensator valve

شکل ۲: طرح‌واره شیر کنترل جریان مجهز به جبران کننده فشار

اریفیس‌های ۱ و ۲ در موقعیت‌های نشان داده شده در شماتیک مدار هیدرولیکی مجموعه به عنوان دمپر^۱ یا میرا کننده نوسانات فشار در سیستم بوده و اثرات وجود یا عدم وجود آن‌ها در مجموعه، در نتایج مدل ریاضی حالت گذرای مجموعه نشان داده شده است. در صورتی که از هیچ اریفیس میرا کننده استفاده نگردد، نوسانات فشار حاصل از پمپ‌های دنده‌ای موجب حرکت‌های نوسانی پلانجر شیر کنترل فشار شده و اختلاف فشار طرفین شیر کنترل جریان ثابت نخواهد بود و بنابراین نوسانات جریان در خروجی شیر اتفاق خواهد افتاد که به هیچ عنوان مطلوب موتور توربینی نخواهد بود. در این شرایط تغییرات جریان سوخت خروجی از نازل، نسبت به تغییرات موقعیت بادامک آن، خطی می‌باشد. که این امر در سیستم‌های اندازه‌گیری سوخت موتورهای توربینی، فرایند کنترل سوخت موتور را به مراتب ساده‌تر و دقیق‌تر می‌کند. تنظیم پیش‌بار فنر تعبیه شده در شیر کنترل فشار در موقعیت ثابت بادامک، موجب تغییر فشار و یا تغییر مقدار جریان سوخت می‌شود. اتصال مستقیم یکی از مزیت‌های مهم طرح ارائه شده است. طراحی شیرهای کنترل جریان با تحریک مستقیم به دلیل مزایای فراوان مانند سادگی و کارآمدی و کاهش هزینه‌های ساخت و نیز کاهش وزن، مورد توجه شرکت‌های سازنده شیرهای کنترلی بوده است [۱۲].

۳- مدل‌سازی و شبیه‌سازی مجموعه در حالت پایا

بررسی عملکرد طرح مفهومی ارائه شده در شکل ۲ نیاز به شبیه‌سازی و مدل‌سازی بر اساس معادلات حاکم بر سیستم دارد و لازمه این امر طراحی اولیه مجموعه و استخراج هندسه و ابعاد تمامی قطعات مجموعه می‌باشد. البته در فرایند مدل‌سازی و شبیه‌سازی ممکن است بسیاری از ابعاد جهت

1 Damper

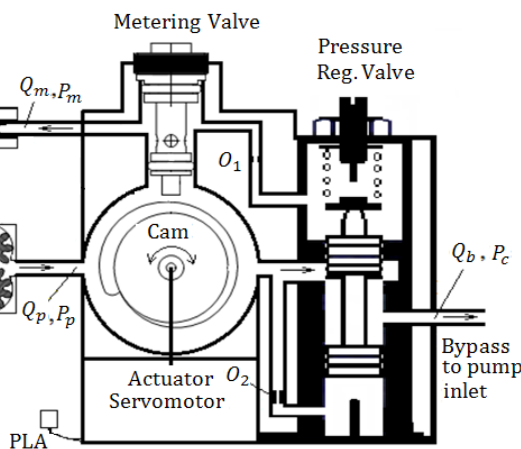


Fig. 3. Schematic of valve and its functional parameters

شکل ۳: طرح‌واره شیر و پارامترهای عملکردی آن

پس از شبیه‌سازی با اعمال اصول پیوستگی جریان برای سیستم مورد بررسی، معادلات پیوستگی به دست می‌آیند. مقدار جریان سوخت ورودی به مجموعه یا Q_p ، برابر مجموع جریانی‌هایی است که از نازل کنترل جریان یا Q_m و شیر تنظیم فشار یا Q_b خارج می‌شود به عبارتی:

$$Q_p = Q_m + Q_b \quad (1)$$

بر اساس روابط حاکم بر پمپ‌ها و شیرها یا اریفیس‌های متغیر می‌توان رابطه فوق را به صورت ذیل نوشت [۱۷ و ۱۸].

نوشت:

$$\begin{cases} Q_p - Q_m - Q_b = 0 \\ Q_n - Q_m = 0 \\ A_b(P_p - P_m) - Ky - F_0 = 0 \end{cases} \quad (۶)$$

در این دستگاه معادلات پارامترهای P_p و P_m و γ پارامترهای وابسته (مجهولات) و سایر پارامترها مستقل هستند. برای حل دستگاه معادلات فوق که کاملاً غیر خطی بوده و در حالت کلی حل تحلیلی ندارد روش‌های مختلفی وجود دارد. در این جا برای حل دستگاه معادلات فوق از روش نیوتن رافسون در نرم افزار متلب استفاده شده است. با توجه به اینکه در دستگاه معادلات (۶) معادله اول غیر خطی می‌باشد بنابراین ضرایب و ثابت‌ها به صورت صریح قابل استخراج نیستند، در عبارات ذیل ضرایب و ثابت‌های دو معادله بعدی با مجهولات P_p و P_m و γ ارائه شده است.

$$(C_{dm}^2 A_m^2) P_p - (C_{dm}^2 A_m^2 + C_{dn}^2 A_n^2) P_m = -C_{dn}^2 A_n^2 P_c$$

$$A_b P_p - A_b P_m - ky = F_0$$

۴- مدل سازی و شبیه سازی مجموعه در حالت گذرا

حالت گذرا رسیدن به مقدار پارامترهای حالت سیستم در هر لحظه از زمان بین دو حالت پایا می‌باشد. بدین منظور ابتدا مدل حالت پایا برای ورودی‌های مختلف حل شده و بدین ترتیب شرایط اولیه برای انجام شبیه سازی حالت گذرا به دست آمده است. از نقطه نظر فیزیکی می‌توان گفت که در واقع جریان سوخت خالص در یک حجم مشخص تبدیل به فشار می‌گردد. معادلات حاکم بر حالت گذرای سیستم به شرح زیر می‌باشند: اگر V_p حجم خطوط انتقال سوخت از منبع تأمین جریان سوخت (مثلاً پمپ سوخت) تا شیر تنظیم اختلاف فشار و شیر تنظیم جریان، لوله حس گر فشار برای شیر تنظیم اختلاف فشار و حجم موجود در قسمت تحتانی پلانجر شیر تنظیم فشار اریفیس ۲ باشد معادله پیوستگی برای این حجم به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{dP_p}{dt} = \frac{\beta}{V_p} \left[Q_p - Q_m - Q_b - C_{dpb} A_{pb} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_p - P_{lb}|} \right] \quad (۷)$$

که در آن، β مدول بالک سوخت، C_{dpb} ضریب تخلیه اریفیس ۲، A_{pb} سطح مقطع این اریفیس، P_{lb} فشار خروجی اریفیس ۲ و t پارامتر زمان می‌باشد. اگر V_m حجم خطوط سوخت از شیر تنظیم جریان تا نازل سوخت پاش و خط انتقال فشار سوخت خروجی از شیر تنظیم جریان تا اریفیس ۱ باشد، معادله پیوستگی برای این حجم به صورت زیر به دست خواهد آمد.

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{\beta}{V_m} \left[Q_m + C_{dmb} A_{mb} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{ub} - P_m|} - Q_n \right] \quad (۸)$$

$$Q_p = \frac{VN}{60} - \frac{C_s V (P_p - P_0)}{2\pi\mu} \quad (۲-الف)$$

$$Q_m = C_{dm} A_m \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_p - P_m)} \quad (۲-ب)$$

$$Q_b = C_{dy} A_y \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_p - P_c)} \quad (۲-پ)$$

که در آن، V حجم جاروب شده در هر دور از گردش پمپ، N دور پمپ سوخت، C_s ضریب نشتی پمپ، μ ویسکوزیته سوخت، P_0 فشار سوخت در ورودی پمپ، C_{dm} ضریب تخلیه در شیر کنترل جرریان، A_m سطح مقطع عبور سوخت در شیر کنترل جریان، P_p و P_m به ترتیب فشار خروجی و ورودی شیر کنترل جریان و ρ چگالی سوخت می‌باشد.

مقدار جریان خارج شده از شیر تنظیم جریان با جریان عبوری از نازل‌های سوخت پاش یا Q_n مساوی می‌باشد.

$$Q_m = Q_n \quad (۳)$$

یا

$$C_{dm} A_m \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_p - P_m)} = C_{dn} A_n \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_m - P_c)} \quad (۴)$$

که در آن، C_{dn} ضریب تخلیه در نازل سوخت پاش، A_n سطح مقطع عبور سوخت در نازل سوخت و P_c فشار در خروجی نازل سوخت است. به منظور محاسبه جابه‌جایی اسپول شیر تنظیم اختلاف فشار که در واقع تعیین کننده مقدار جریان کنار گذر شده می‌باشد از قانون تعادل نیروهای مؤثر بر اسپول شیر استفاده می‌شود.

$$A_b (P_p - P_m) = Ky + F_0 \quad (۵)$$

که در آن، K ثابت فنر و F_0 نیروی پیش بار فنر، A_b سطح مقطع مؤثر پلانجر شیر کنترل فشار و γ مقدار جابه‌جایی پلانجر است. در شیرهای کنترل که دارای پلانجرهای متحرک می‌باشند (مانند شیر کنترل فشار)، برای به حداقل رساندن نیروهای نامتقارن عرضی یا جانبی که موجب افزایش نیروهای اصطکاک بین پلانجر و اسلیو می‌گردد، شیارهای عرضی در پیرامون نشیمن‌گاه‌های (تکیه‌گاه‌ها) پلانجر ماشین کاری شده است تا با متعادل کردن فشار سیال، پلانجر را در مرکز اسلیو حفظ کند [۱۹].

در این طرح ورودی مجموعه اندازه‌گیری سوخت، موقعیت بادامک شیر تنظیم جریان یا θ می‌باشد که به صورت مساحت مقطع عبور جریان سوخت از نازل در روابط فوق ظاهر می‌شود. این سطح تابعی خطی از زاویه θ می‌باشد. در واقع محرکه الکترونیکی نصب شده روی مجموعه و متصل به بادامک، بر اساس فرمان دریافتی، موقعیت بادامک را تعیین می‌کند. معادلات حاکم بر سیستم را می‌توان در دستگاه معادلات غیر خطی به شکل زیر

جدول ۱: عدم قطعیت داده‌های آزمایش

Table 1. Uncertainty of test data

عدم قطعیت	واحد	پارامتر
±۱٪	کیلوگرم در ساعت	جریان سنج‌ها
±۲٪	بار	حسگر فشار
±۰.۳٪	دور در دقیقه	حسگر دور

تغییرات دور موتور برحسب تغییرات مقدار جریان سوخت، مقدار حداکثر مجاز تغییرات جریان سوخت حاصل می‌شود. پس از نصب مجموعه روی استند و برقراری اتصال مکانیکی بین موتور الکتریکی و پمپ سوخت با یک کولپینک مناسب، اتصالات هیدرولیکی بین استند آزمایش و مجموعه تحت آزمایش برقرار می‌گردد. سوخت تنظیم شده خروجی مجموعه، وارد نازل معادل می‌گردد که در واقع یک مقاومت هیدرولیکی محاسبه شده و نماینده نازل‌های سوخت‌پاش موتور می‌باشد. سوخت خارج شده از نازل معادل وارد یک شیر کنترل جریان قابل تنظیم دستی می‌گردد که نماینده اثرات فشار پس از نازل‌های سوخت‌پاش می‌باشد. این شیر در حالت عادی باز بوده و در فرایند آزمایش تنظیم می‌گردد. سوخت خروجی از این شیر پس از عبور از جریان سنج وارد تانک سوخت در استند آزمایش می‌شود. انجام آزمایش‌ها و ثبت اطلاعات در موقعیت‌های مختلف فرمان ورودی و در دوره‌های مختلف پمپ سوخت می‌باشد. در شکل ۴، مدار هیدرولیکی آزمایش مجموعه، نشان داده شده است.

در شکل ۵ (الف)، نمودار تغییرات مقدار جریان ورودی به مجموعه توسط پمپ (مقدار جریان اندازه‌گیری نشده)، جریان کنارگذر و مقدار جریان

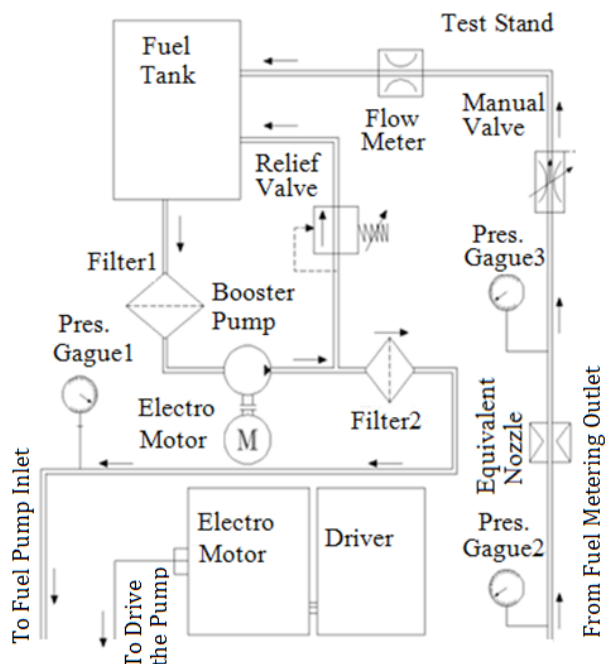


Fig. 4. Schematic of test hydraulic diagram

شکل ۴: طرح‌واره مدار هیدرولیکی استند آزمایش

که در آن، C_{dmb} و A_{mb} به ترتیب ضریب تخلیه و سطح مقطع عبور سوخت در اریفیس ۱ و P_{ub} فشار بعد از این اریفیس است. اگر V_{ub} حجم خط فشار از اریفیس ۱ تا محفظه بالای پلانجر شیر تنظیم اختلاف فشار و نیز حجم این محفظه باشد، معادله پیوستگی برای این حجم به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{dP_{ub}}{dt} = \frac{\beta}{V_{ub}} \left[A_b \frac{dy}{dt} - C_{dmb} A_{mb} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{ub} - P_m|} \right] \quad (9)$$

اگر V_{lb} حجم خط فشار از اریفیس ۲ تا محفظه زیر شیر تنظیم اختلاف فشار و نیز حجم این محفظه باشد، معادله پیوستگی برای این حجم به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{dP_{lb}}{dt} = \frac{\beta}{V_{lb}} \left[C_{dpb} A_{pb} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_p - P_{lb}|} - A_b \frac{dy}{dt} \right] \quad (10)$$

دینامیک اسپول شیر تنظیم فشار

$$\frac{d^2y}{dt} = \frac{1}{M} [A_b (P_{lb} - P_{ub}) - Ky - F_0] \quad (11)$$

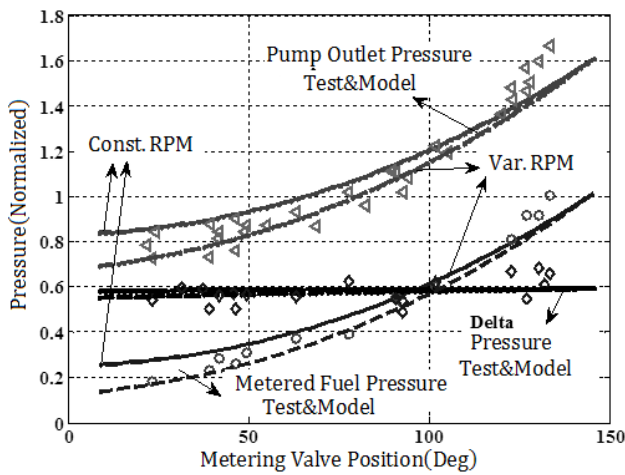
که در آن M جرم پلانجر می‌باشد و تأثیر زیادی در پاسخ دینامیکی سیستم دارد. مقدار زیاد آن باعث افزایش دامنه نوسانات اسپول در فرایند حالت گذرا می‌شود و بنابراین مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا سیستم به نقطه پایای خود برسد. بنابراین پاسخ زمانی سیستم کندتر می‌شود. در معادلات بالا β به‌عنوان مدول بالک سوخت می‌باشد که معیاری از تراکم‌پذیری سوخت است. مقدار عددی β به شدت تابع حباب‌های هوای محلول در سوخت می‌باشد و فرض شده‌است که حبابی در سوخت موجود نباشد. حل دستگاه معادلات دیفرانسیل ۷ تا ۱۱ جهت استخراج مجهولات $ode45$ مورد P_{ub} ، P_{lb} ، y ، P_m ، P_p در نرم‌افزار متلب با روش حل ode45 مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به غیر خطی بودن معادلات فوق، استخراج ضرایب و ثابت‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۵- روند انجام آزمایش، نتایج و بحث بر روی نتایج

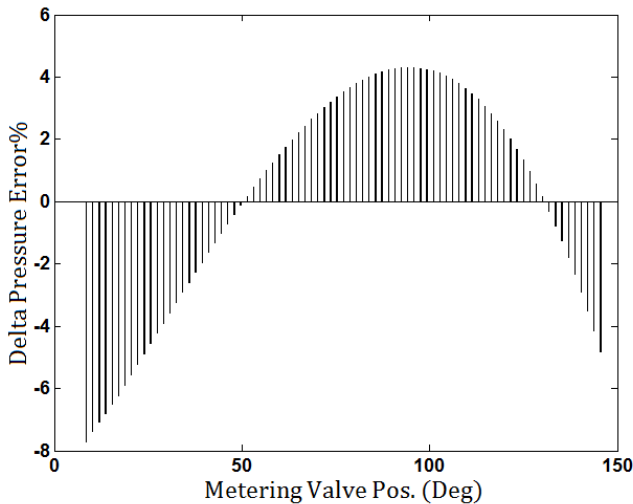
جهت رسیدن به نتایج دقیق‌تر، قبل از شروع آزمایش‌ها، حس‌گرهای مربوط به اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی مجموعه (جریان‌سنج و فشارسنج‌ها و حسگر دور)، کالیبره می‌شوند. عدم قطعیت داده‌های آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

اساس انتخاب دقت اندازه‌گیری فلومتر توربینی برای اندازه‌گیری مقدار جریان سوخت که تنها پارامتر مستقل کنترلی می‌باشد، بستگی به دقت کنترلی سیستم کنترل سوخت بر اساس دقت مورد نیاز پارامترهای عملکردی موتور مانند دور موتور دارد. از آنجایی که دقت کنترلی برای پارامتر دور موتور براساس نیازمندی‌های کنترلی موتور در نظر گرفته شده است، دقت اندازه‌گیری فلومتر توربینی استخراج می‌شود. بر این اساس از نمودار

در شکل ۶(الف)، نمودار تغییرات فشارهای ورودی و خروجی شیر کنترل جریان یا به عبارتی بادامک-نازل و نیز اختلاف فشار طرفین این شیر بر حسب موقعیت تراتل در دو حالت دور ثابت و دور متغیر نشان داده شده است. جهت ارزیابی و اعتبار سنجی نتایج مدل شبیه‌سازی شده، نتایج آزمایش‌های اخذ شده از مجموعه ساختی روی استند آزمایش نیز در این شکل ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف فشار ورودی و خروجی شیر اندازه‌گیری سوخت با خطای نسبی ۲/۵ درصد در دور ثابت پمپ و خطای نسبی ۶/۷ درصد در دور متغیر پمپ، ثابت باقی می‌ماند. در شکل ۶(ب) نمودار خطای بین نتایج آزمایش و نتایج مدل برای اختلاف فشار طرفین شیر کنترل جریان نشان داده شده است.



(الف)

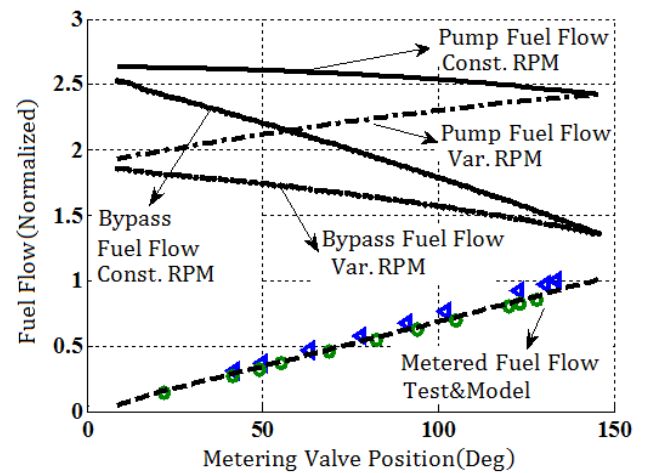


(ب)

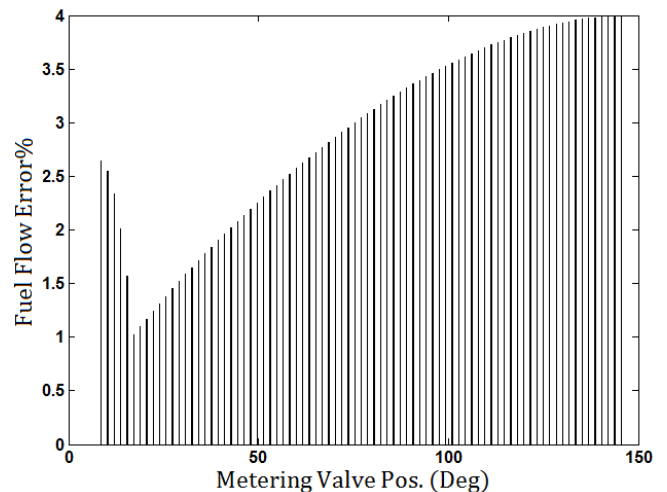
Fig. 6. (a) Changes in the inlet and outlet pressures and the pressure difference across versus the input command
(b) Diagram of error between test and simulation results

شکل ۶: (الف) نمودار تغییرات فشارهای ورودی و خروجی مجموعه و اختلاف فشار طرفین شیر کنترل جریان نسبت به فرمان ورودی، (ب) نمودار خطای بین نتایج آزمایش و نتایج مدل

اندازه‌گیری شده خروجی نسبت به فرمان ورودی در مقایسه با نتایج آزمایش، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش فرمان ورودی، مقدار سوخت اندازه‌گیری شده متناسب با آن افزایش یافته و این تغییرات در دور ثابت و متغیر پمپ یکسان بوده و مستقل از دور پمپ می‌باشد. تغییرات مقدار سوخت کنارگذر، معکوس تغییرات سوخت اندازه‌گیری شده بوده و مجموعه آن‌ها با مقدار جریان سوخت خروجی پمپ یکسان می‌باشد. دلیل کاهش مقدار جریان سوخت خروجی پمپ (در دور ثابت) نشی پمپ به دلیل افزایش فشار خروجی آن می‌باشد. در شکل ۵(ب) نمودار اختلاف نتایج آزمایش و نتایج مدل نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که کمترین و بیشترین مقدار اختلاف نتایج، بین ۱ تا ۵ درصد می‌باشد.



(الف)



(ب)

Fig. 5. (a) Diagram of Input, outflow and output flow, versus the input command (cam position)
(b) Diagram of error between test and simulation results

شکل ۵: (الف) نمودار تغییرات جریان‌های ورودی، کنارگذر و خروجی مجموعه نسبت به فرمان ورودی (موقعیت بادامک)، (ب) نمودار خطای بین نتایج آزمایش و نتایج مدل

این نمودار از ترکیب یک فرمان سینوسی (قسمتی از نمودار سینوسی به صورت افزایشی و کاهشی) و یک فرمان پله جهت بررسی عکس العمل سیستم به این ورودی می‌باشد. عکس العمل مجموعه طراحی شده در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

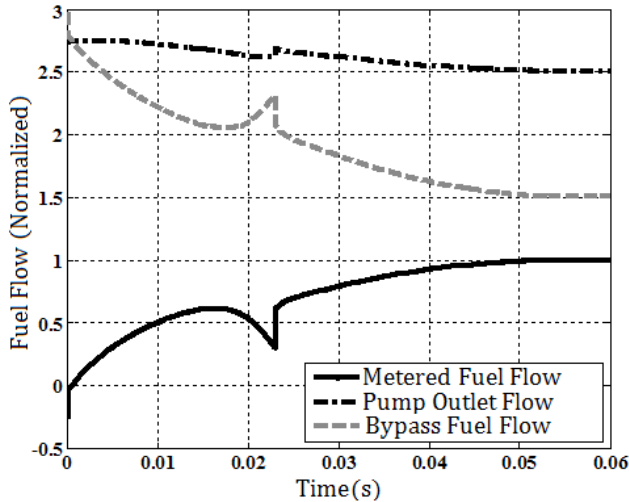


Fig. 8. The pump outlet flow, the measured flow, and the amount of flow versus the time

شکل ۸: نمودار تغییرات مقدار جریان خروجی پمپ، مقدار جریان اندازه‌گیری شده و مقدار جریان کنارگذر نسبت به زمان

در شکل ۸ نمودار تغییرات مقدار جریان ورودی به مجموعه (خروجی پمپ)، مقدار جریان خروجی مجموعه (جریان اندازه‌گیری شده) و مقدار جریان کنارگذر در دور حداکثر پمپ نشان داده شده است. در این شکل مقدار جریان خروجی پمپ در دور حداکثر از نظر تئوری باید ثابت باشد ولی تغییرات اندکی به صورت کاهشی در آن دیده می‌شود که ناشی از نشتی پمپ به دلیل افزایش فشار خروجی پمپ می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که متناسب با فرمان تراشل مقدار جریان خروجی سیستم تغییر نموده و مقدار جریان کنارگذر طوری تغییر می‌کند که همواره مجموع جریان‌های خروجی و کنارگذر برابر با مقدار جریان پمپ باشد. دلیل جهش نمودارهای پاسخ در زمان $T=0.023s$ به دلیل پاسخ به ورودی پله می‌باشد. به عبارت دیگر در این لحظه، فرمان ورودی به مجموعه به صورت پله‌ای افزایش ناگهانی پیدا می‌کند. برای مثال در شکل ۸، مقدار جریان اندازه‌گیری شده بر اساس ورودی پله و باز شدن شیر کنترل جریان به طور ناگهانی، افزایش جهشی نشان می‌دهد که رفتاری منطقی و درست می‌باشد. در این شکل به همان نسبت افزایش ناگهانی سوخت اندازه‌گیری شده، سوخت کنارگذر نیز به همان شدت کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۹ نمودار تغییرات فشار خروجی پمپ یا فشار ورودی شیر کنترل جریان و فشار خروجی این شیر و اختلاف این دو فشار نسبت به زمان نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود که متناسب با تغییرات تراشل، مقدار فشار خروجی شیر

خطاهای محاسبه شده نسبت به خط متوسط یا میانگین نتایج آزمایش مجموعه در شرایط مختلف کاری می‌باشد. این رفتار اثرات قابل توجهی در بالا بردن دقت کنترلی مجموعه داشته و سبب می‌گردد که خروجی سیستم یا مقدار جریان سوخت اندازه‌گیری شده از تغییرات فشار و یا جریان در ورودی مجموعه و نیز تغییرات فشار در خروجی مجموعه مستقل بوده و فقط تابعی از موقعیت بادامک شیر کنترل جریان باشد. در واقع تغییرات در مقدار جریان و فشار ورودی مجموعه به وسیله شیر کنترل فشار خنثی شده و با تغییرات در مقدار جریان کنارگذر جبران‌سازی می‌شود. به بیانی دیگر می‌توان نتیجه گرفت که مقدار جریان خروجی مجموعه مستقل از دور پمپ می‌باشد. در بسیاری از موتورهای توربینی، پمپ سوخت توان خود را از موتور می‌گیرد و دور پمپ نسبتی از دور موتور است. ولی در برخی موارد پمپ توان خود را از یک موتور الکتریکی دریافت می‌کند. با توجه به افزایش دور موتور از دور آرام تا دور حداکثر، دور پمپ و مقدار جریان خروجی آن نیز افزایش می‌یابد. متناسب با افزایش مقدار جریان پمپ، فشار خروجی و نیز نشتی پمپ نیز افزایش پیدا می‌کند. مقدار جریان اندازه‌گیری شده خروجی مجموعه با مقدار جریان کنارگذر رفتار معکوس دارند به طوری که هرچه مقدار جریان خروجی افزایش پیدا کند مقدار جریان کنارگذر کاهش پیدا می‌کند. ولی همواره مجموع دو جریان خروجی با مقدار کل جریان ورودی (جریان پمپ) برابر است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مجموعه ارائه شده، مستقل بودن مقدار جریان خروجی آن از دور پمپ یا شرایط ورودی می‌باشد. به عبارتی دیگر با ثابت بودن فرمان تراشل، مقدار جریان خروجی مجموعه نیز ثابت می‌ماند حتی اگر دور موتور یا دور پمپ تغییرات داشته باشد.

در شکل ۷ نمودار تغییرات تراشل نسبت به زمان یا به عبارتی، ورودی مجموعه نشان داده شده است. این ورودی افزایش و کاهش تراشل و یا شتاب‌گیری و کاهش شتاب و ورودی پله را در بر دارد. خروجی‌های مجموعه بر اثر این ورودی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

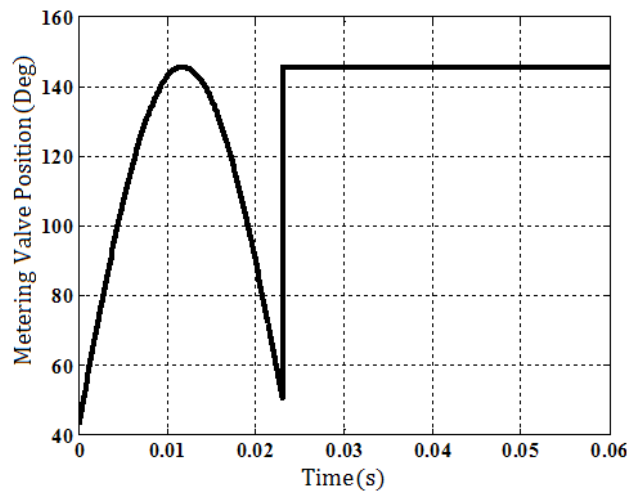


Fig. 7. diagram of the system input (Throttle) versus the time

شکل ۷: نمودار ورودی سیستم (تراشل) بر حسب زمان

شیر کنترل جریان می‌باشد که بر اساس فرمان ورودی پله می‌باشد. البته این رفتار جهشی در صورت عدم وجود اریفیس، شدت بیشتری دارد. ملاحظه می‌شود که تغییرات فشار در ورودی بدون نوسان تغییر نموده و به مقدار پایدار خود رسیده است. در صورتی که یکی از اریفیس‌ها (به‌خصوص اریفیس ۲) از مدار حذف گردد، نمودار تغییرات فشار در شروع، نوسانی شده و موجب تغییر موقعیت پلانجر شیر کنترل فشار می‌گردد و در نهایت بر مقدار جریان خروجی اثر می‌گذارد. در صورتی که هر دو اریفیس حذف گردد، مقدار فشار نوسانات شدیدتری پیدا کرده و اثرات لرزشی شدیدی بر مجموعه در موقع آزمایش می‌گذارد. این موضوع در شرایطی که از پمپ‌های سوخت دنده‌ای در ورودی مجموعه استفاده گردد، به دلیل نوسانات فشار به صورت طبیعی در خروجی پمپ‌های دنده‌ای موجب نوسان پلانجر در شیر تنظیم فشار شده و نیز نوسان در جریان سوخت کنارگذر و جریان سوخت در خروجی مجموعه می‌گردد. که برای کنترل موتور مطلوب نمی‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نوع شیر کنترل جریان دورانی بهینه از نوع بادامک-نازل، جهت اندازه‌گیری دقیق سوخت مجهز به یک شیر جبران‌کننده فشار و محرکه الکترونیکی از نوع سروموتور ارائه شده است. این مجموعه جهت استفاده در سیستم‌های کنترل سوخت موتورهای توربوجت می‌باشد که کوپل مستقیم و بدون واسطه محرکه به بادامک شیر کنترل جریان و سبکی و سادگی و کارآمدی مجموعه و هزینه‌های پایین طراحی، ساخت و آزمایش از ویژگی‌های مجموعه می‌باشد. نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم و نیز نتایج آزمایش نمونه‌های ساخته شده نشان دهنده دقت کنترلی بالا و نیز کارایی مجموعه برای رفع نیازهای حوزه هوایی در خصوص موتورهای سبک نصب شده بر روی وسایل پرنده بدون سرنشین می‌باشد. وجود خطای ۰/۶ تا ۵ درصد بین نتایج مدل ریاضی و نتایج آزمایش نشان دهنده دقت مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی مجموعه می‌باشد.

فهرست علائم

A_b	مساحت مقطع پلانجر شیر کنترل فشار (m^2)
A_m	مساحت عبور جریان در شیر کنترل جریان (m^2)
A_{mb}	مساحت مقطع اریفیس ۱ (m^2)
A_{pb}	مساحت عبور جریان در اریفیس ۲ (m^2)
A_y	مساحت عبور جریان در شیر کنترل فشار (m^2)
A_n	مساحت مقطع مجموعه نازل‌های سوخت پاش (m^2)
C_{dm}	ضریب تخلیه در شیر کنترل جریان
C_{dn}	ضریب تخلیه در نازل سوخت پاش
C_{dmb}	ضریب تخلیه در اریفیس ۱
C_{dpb}	ضریب تخلیه در اریفیس ۲

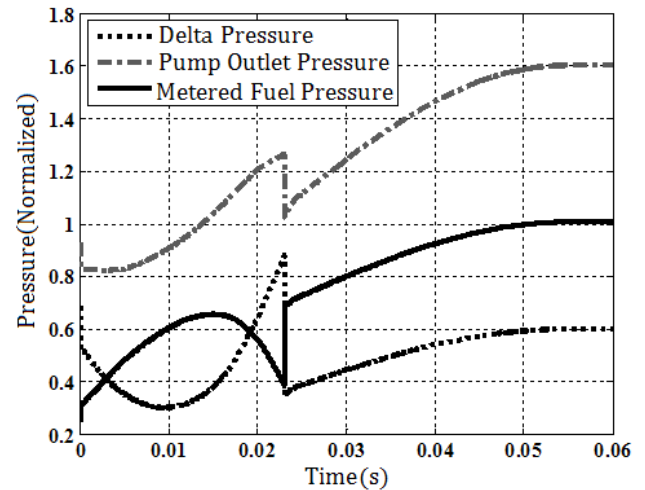


Fig. 9. Changes in pump outlet pressure and the effect of dampening orifices in it

شکل ۹: نمودار تغییرات فشار خروجی پمپ و شیر کنترل جریان و اختلاف این دو فشار نسبت به زمان

کنترل جریان (بادامک-نازل) نیز تغییر می‌کند. اختلاف فشار طرفین شیر کنترل جریان در مدت زمان تراشل (فرایند گذرا) ثابت نبوده ولی تغییرات آن بلافاصله پس از ثابت شدن تراشل به پایداری می‌رسد. در این شکل با توجه به باز شدن ناگهانی شیر کنترل جریان، و کاهش مقاومت مسیر سوخت در خروجی پمپ، فشار خروجی پمپ کاهش جهشی و فشار خروجی شیر کنترل جریان، افزایش جهشی نشان می‌دهد که به دلیل افزایش ناگهانی سوخت می‌باشد.

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات فشار خروجی پمپ یا فشار ورودی به شیر کنترل جریان نسبت به زمان در سه حالت نشان داده شده است. در حالت اول هر دو اریفیس میرا کننده ۱ و ۲ در مدار هیدرولیکی مجموعه نصب شده‌اند. در شکل ۱۰، جهش کاهش فشار خروجی پمپ به دلیل باز شدن ناگهانی

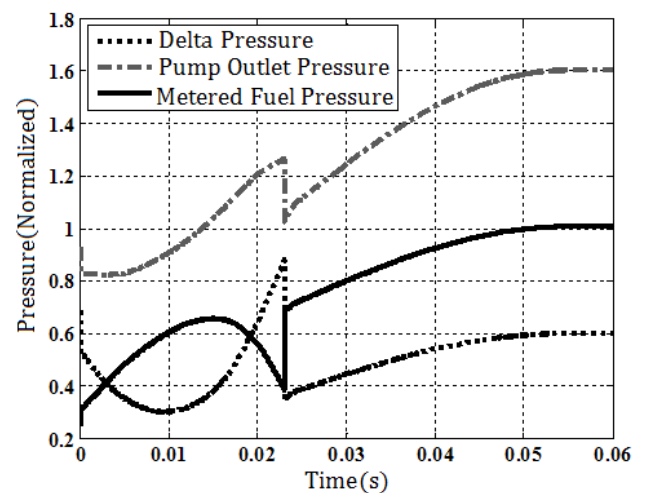


Fig. 10. Chart of the pump outlet pressure and the effect of dampening orifices in it

شکل ۱۰: نمودار تغییرات فشار خروجی پمپ و اثر اریفیس‌های میرا کننده در آن

- Small Gas Turbine Engines*, Concordia University Montreal, Quebec Canada, Canada., 1997.
- [5] F. Peter, W.L. Spa, *Fuel system for a gas turbine engine*, in: E.P. Office (Ed.) European Patent Office, England, 2013, pp. 8.
- [6] M.Montazeri, T.Hamzhepoor, *Modeling and simulation of a new electro hydro mechanical fuel control system for a gas turbine engine*, Iran University of Science and Technology, Iran Tehran, 2003.
- [7] M.Montazeri, H.Bagerinezhad, *Manufacturing of an electro hydro mechanical fuel control system for a gas turbine engine*, Iran University of Science and Technology Iran, Tehran, 2004.
- [8] M.Montazeri, A.Yousefi, *Designing of an electro hydro mechanical fuel control system for a gas turbine engine*, Iran, Tehran, Iran University of Science and Technology Tehran Iran, 2006.
- [9] R.J. Francois, G. Gilles, C. Alain, MICROTURBO Families of Turbojet Engine for Missiles and UAV's From the TR60 to the new bypass turbojet engine generation, in: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Join Propulsion Conference & Exhibit, *AIAA* 2008-4590, France, 2008.
- [10] J.R. Paul, B.D. James, *Rotary metering valve arrangement*, in: E.P. Office (Ed.) European Patent Office, France, 2011.
- [11] M. Klimko, *Mathematical model of the jet engine fuel system*, in: D.o.P.S. Engineering (Ed.) EPJ Web of Conferences, published by EDP Sciences, Bohemia, 2015.
- [12] Direct Drive Servovalves (D.D.V), in: <http://www.moog.com>, 2009.
- [13] N.S. Nise, *Control System Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Printed in the United States of America., 2011.
- [14] J. Lal, *Hydraulic Machines*, USA, 1975.
- [15] M.Montazeri, S.Jafari, *Design And Optimization of jet engine fuel controller based on Min-Max approach*, Iran University of Sience and Technology, Iran Tehran, 2011.
- [16] O. Katsuhiko, *Modern control engineering*, Prentice Hall, United States Of America, 2010.
- [17] W. Wilson, *Rotary-Pump Theory*, ASTM, 68 (1946)
- ضریب تخلیه در شیر کنترل فشار C_{dy}
- نیروی پیشبار فنر شیر کنترل فشار (N) F_0
- ضریب سختی فنر شیر کنترل فشار (Nm^{-1}) K
- جرم پلانجر شیر کنترل فشار (kg) M
- فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$) P
- فشار محفظه احتراق ($kgm^{-1}s^{-2}$) P_c
- فشار خروجی اریفیس ($kgm^{-1}s^{-2}$) P_{tb}
- فشار خروجی شیر کنترل جریان ($kgm^{-1}s^{-2}$) P_m
- فشار بعد از اریفیس ۱ ($kgm^{-1}s^{-2}$) P_{ub}
- فشار خروجی پمپ ($kgm^{-1}s^{-2}$) P_p
- جریان حجمی عبوری از شیر کنترل فشار (m^3s^{-1}) Q_b
- جریان حجمی عبوری از شیر کنترل جریان (m^3s^{-1}) Q_m
- جریان حجمی عبوری از نازل‌های سوخت (m^3s^{-1}) Q_n
- جریان حجمی عبوری از پمپ (m^3s^{-1}) Q_p
- زمان (s) t
- حجم خط فشار اریفیس ۲ (m^3) V_{tb}
- حجم جریان سوخت از شیر تنظیم جریان تا نازل‌ها (m^3) V_m
- حجم خطوط سوخت بعد از پمپ تا امان‌ها (m^3) V_p
- حجم سوخت در خط فشار اریفیس ۱ (m^3) V_{ub}
- مقدار جابجایی پلانجر شیر کنترل فشار (m^3) y
- علامت یونانی**
- مدول بالک سوخت β
- زاویه چرخش بادامک شیر کنترل جریان (deg) θ
- چگالی سوخت (kgm^{-3}) ρ

منابع

- [1] S.R. Balakrishnan, Control System Development Experience for Aero Gas Turbine Demonstrator Engines, *Progress in Nonlinear Dynamics and Chaos*, 1 (2013) 15-22.
- [2] B. MacIsaac, R. Langton, *Gas turbine propulsion systems*, 1 ed., John Wiley and Sons Ltd, USA, 2011.
- [3] T.Krepec, A.I. Georgants, New family of low cost electronic fuel control units for small gas turbine engines, *Journal of Aerospace*, 99 No.1 (1990).
- [4] S.S. Mohtasebi, *Investigation on New Low Cost Electronically Controlled Fuel Metering Systems for*

[19] Q. Yuan, P.Y. Li, An Experimental Study on the Use of Unstable Electro hydraulic Valves for Control, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, (2002).

371.

[18] H.E. Merritt, *Hydraulic Control Systems*, John Wiley and Sons Ltd, USA NY, 1967.

Please cite this article using:

S. mojjallal agh, J. pirkandi, M. mahmoodi, M. jahromi, The Design of a New Rotary Flow Control Valve with a Pressure Compensator for a Turbojet Engine, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 413-424.
DOI: 10.22060/mej.2017.11936.5222

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



