فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

تنظیم دریچهٔ هدررو پُرخوران با روش زمان‌بندی بهره با GT-POWER و MATLAB

سید علیرضا شریفی[۱*]، پیمان یوسفی[۲]، صابر میرزالی[۳]، احسان عباسی[۴]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، sharifi_sa@mech.sharif.edu

[۲] کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز پیشرانش نهاب، تهران، ایران، kppusefi@ihu.ac.ir

[۳] کارشناسی ارشد هوا و فضا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز پیشرانش نهاب، تهران، ایران، kpmirzali@ihu.ac.ir

[۲] کارشناسی ارشد هوا و فضا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز پیشرانش نهاب، تهران، ایران، abbasi_e@alumni.iust.ac.ir

* نویسندهٔ مسئول

چکیده

پُرخوران‌ها برای افزایش فشار هوای راهگاه ورودی موتور استفاده می‌شوند. مسئله بسیار مهم در پُرخوران‌ها، مهار فشار هوای راهگاه ورودی موتور است که این موضوع از طریق مهار سرعت پُرخوران صورت می‌پذیرد، اما از آنجایی‌که مهار سرعت پُرخوران به‌صورت مستقیم از لحاظ عملی امری دشوار است، لذا این کار، به‌صورت غیرمستقیم و از طریق دریچه‌ای به نام هدررو که در خروجی موتور و ورودی گَردای پُرخوران قرار می‌گیرد، انجام می‌پذیرد. یکی از روش‌های مهار پرکاربرد در صنعت، مهار زمان‌بندی بهره است. این روش برای مهار عملکرد پُرخوران در سه بخش: متغیرهای مهارکننده، ناظر و سامانه، طراحی شده و استفاده شده است. عملکرد صحیح یک حلقهٔ مهار را می‌توان با صحت شبیه‌سازی در نظر گرفته‌شده برای سامانه و مهارکنندهٔ مناسب طراحی‌شده، ارزیابی نمود. در این مقاله ابتدا شبیه‌سازی موتور موردنظر با پُرخوران در GT-POWER ایجاد شد. سپس با تعریف متغیرهای ورودی و خروجی در شبیه‌سازی ایجادشده در نرم‌افزار GT-POWER، شبیه‌سازی برای طراحی مهارکننده با نرم‌افزار MATLAB متصل می‌شود. در گام بعدی دو روش برای طراحی مهارکننده‌های مناسب برای روش مهار زمان‌بندی بهره ارائه‌شده است، درنهایت مؤثر بودن روش مهار زمان‌بندی بهره برای مهار پُرخوران نشان داده می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

دریافت: ۲۰ آبان ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

پُرخوران

مهار زمان‌بندی بهره

مهار پُرخوران

شناسایی سامانه

MATLAB

GT-POWER

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

افزایش قدرت و بازده خروجی موتور، موضوعی مهم است. روش‌های مختلفی برای انجام این امر مهم وجود داشته که با وجود مؤثر بودن، تفاوت‌های بسیاری باهم دارند. از جمله این روش‌ها می‌توان به سَبُک‌سازی میل‌لنگ و دنده چرخ طیار تا انواع روش‌های پرخوران موتور اشاره نمود. در پرخوران کردن موتور، با افزایش حجم هوای (اکسیژن) داخل استوانه، تنفس موتور را بهبود بخشیده و شرایط پاشش سوخت و دریافت توان بیشتر از موتور فراهم می‌شود.

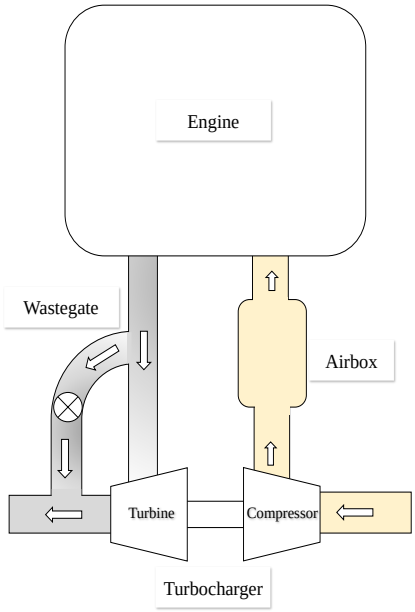
پُرخوران وسیله‌ای است که عمل پرخوران کردن موتور را با کمک گَردا و تنجار انجام می‌دهد. پُرخوران نسبت قدرت به وزن موتور را با استفاده از انرژی گازهای خروجی و چرخاندن یک گَردای متصل به تنجار، افزایش می‌دهد [۱].

یکی از مسئله‌های مهم در پُرخوران مقدار فشار هوای ورودی به موتور یا فشار راهگاه ورودی است، که مقدار مناسب آن باعث بهینه بودن احتراق می‌شود [۲]. در این مقاله هدف، تثبیت فشار راهگاه ورودی در شرایط تغییر فشار محیط است. برای مهار فشار ورودی به موتور، مقدار گشودگی هدررو گَردا باید مهار شود [۳].

با توجه شکل (۱)، اگر هدررو[1] کاملاً بسته باشد، تمام شار گاز خروجی موتور از گَردا می‌گذرد و لذا باعث چرخیدن بیشتر گَردا می‌شود و این کار باعث چرخش بیشتر تنجار شده و در نهایت هوای ورودی فشرده‌تری در اختیار موتور قرار می‌گیرد. همچنین هر قدر دریچه بازتر باشد، شار گاز خروجی کمتری از گَردا عبور می‌کند و در نتیجه سرعت گَردا و تنجار کمتر شده و در نهایت از فشردگی هوای ورودی به موتور کاسته می‌شود.

مهار زمان‌بندی بهره[2] [۴]، یک روش مهار تطبیقی است که در صنعت برای مهار سامانه‌های غیرخطی و متغیر با زمان بسیار پرکاربرد است. یکی از دلایل پرکاربرد بودن این روش سادگی سامانه و نحوهٔ به‌کارگیری آن است. در این روش، بازهٔ کاری سامانه به چند قسمت یا محدوده کاری تقسیم شده و سپس برای این محدوده‌ها مهارکننده‌ای مناسب طراحی می‌شود، سپس متغیرهای این مهارکننده‌ها در جدولی قرار داده می‌شود. درنهایت در طول مانور سامانه و با توجه به نقطهٔ کاری آن، متغیرهای مهاری مناسب توسط ناظر از جدول یادشده انتخاب می‌شود. بدین‌صورت سامانه در تمام بازه کاری، عملکرد مناسبی خواهد داشت.

در زمینه مهار پُرخوران از روش‌های متنوع مهاری استفاده شده است. در [۵] با استفاده از مهارکننده پیش‌بین[3]، اقدام به مهار گشتاور موتورهای دیزلی شده است. همچنین از این روش مهاری در [۶] برای مهار فشار ورودی به موتور استفاده شده است، که در آن با به دست آوردن شبیه‌سازی فضای حالتی از سامانه موتور با پُرخوران، مقدار زاویه دریچه ورودی و هدررو از طریق مهار پیش‌بین محاسبه می‌شود.



شکل ۱: شماتیک پُرخوران، هدررو و محل قرارگیری آن‌ها

از مزایای استفاده این روش مهاری، در نظر گرفتن قیود عملگرها و سایر متغیرهای سامانه در محاسبه علامت مهاری است. برخی دیگر از روش‌های مهار پُرخوران بر اساس رفتار سامانه موتور و پُرخوران بوده که ازجمله کارهای انجام‌شده در این زمینه می‌توان به [۷] اشاره نمود که در آن مهار پُرخوران از طریق یک دسته مهارکننده‌های فازی صورت پذیرفته است. برخی دیگر از روش‌های مهار پُرخوران از شبیه‌سازی غیرخطی و یا خطی‌سازی شده از سامانه موتور و پُرخوران بهره برده و سپس مهارکننده طراحی شده است [۱۰-۸]. در [۱۱] با داشتن شبیه‌سازی مقدار میانگین موتور که صحت آن با داده‌های عملی راستی آزمایی شده، شبیه‌سازی تابع تبدیلی برای هدررو از طریق شناسایی سامانه تخمین زده‌شده و مهار زمان‌بندی بهره برای آن طراحی شده است.

برای طراحی مهارکننده، وجود یک شبیه‌سازی از سامانه امری مهم است. از آنجایی‌که موتورهای هوایی، موتورهایی نسبتاً بزرگ و با قیمت بالایی هستند، آزمون‌گیری و آزمایش بر روی این موتورها هزینه زیادی را به دنبال دارد. به عبارتی هرچقدر آزمایش بر روی این موتورها کمتر صورت پذیرد، باعث آسیب‌دیدگی کمتر آن‌ها می‌شود. برای کاهش انجام آزمون روی این موتورها، بهتر است که ابتدا شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای آن‌ها در نظر گرفته شود و سپس این شبیه‌سازی صورت گرفته شده با نتایج چند آزمون مناسب صحت سنجی شود. همچنین آزمون‌های دیگر نیز تا حد ممکن براساس نتایج شبیه‌سازی صورت پذیرد.

[1] Waste-Gate
[2] Gain Scheduling Control
[3] Model Predictive Control (MPC)

برای طراحی و آزمون سامانهٔ مهاری، بهتر است ک شبیه‌سازی معتبری از موتور که رفتار و مشخصات آن را داشته باشد ایجاد شود. این شبیه‌سازی علاوه بر همخوانی مناسب با رفتار موتور، باید با سرعت مناسب در محاسبات، به‌خوبی با نرم‌افزاری که در آن شبیه‌سازی مهاری ایجاد می‌شود مرتبط گردد. ازاین‌رو شبیه‌سازی یک‌بعدی موتور در نرم‌افزار تجاری GT-POWER ایجاد و اعتبارسنجی شده است، سپس به کمک رابط‌های موجود در این نرم‌افزار، شبیه‌سازی موتور با بخش Simulink نرم‌افزار MATLAB ارتباط می‌یابد. طراحی مهار کننده در محیط MATLAB امکان توسعه ساختار مهاری و تنظیم به صورت آنلاین را فراهم می کند، همچنین وجود شبیه‌سازی موتور در نرم افزار GT-POWER کمک به شبیه سازی دقیق‌تر سامانهٔ مهاری موتور را ایجاد می‌کند.

شبیه‌سازی کامل و معتبر در GT-POWER، قابلیت تبدیل به شبیه‌سازی مقدار میانگین موتور را داراست که این کار باعث ساده‌سازی شبیه‌سازی، با استفاده از نقشه نقاط عملکردی موتور می‌شود. این کار قابلیت حل بسیار سریع‌تر شبیه‌سازی موتور را برای انجام عمل مهار فراهم می‌کند. با توجه به شبیه‌سازی معتبر ایجادشده در این نرم‌افزار می‌توان از این شبیه‌سازی برای طراحی مهارکننده استفاده نمود.

با توجه به اینکه تاکنون مهار موتور هوایی با کمک برنامه GT-POWER و روش مهار تطبیقی صورت نپذیرفته است، لذا این مقاله در تلاش است عملکرد مناسب مهار زمان‌بندی بهره را با کمک شبیه‌سازی یک موتور هوایی در برنامه GT-POWER را نشان دهد. برای این کار شبیه‌سازی موتور هوایی در GT-POWER شبیه‌سازی و با داده‌های آزمون صحت سنجی شده است. سپس این برنامه با نرم‌افزار MATLAB مرتبط گردیده و عمل مهار در محیط MATLAB صورت پذیرفته است.

با توجه به این‌که از شبیه‌سازی شبیه‌سازی‌شده و نه شبیه‌سازی ریاضی برای مهار سامانه استفاده می‌شود، لذا روش نوینی برای طراحی مهارکننده در محدوده نقاط کاری معرفی‌شده و درنهایت عملکرد کلی حلقه مهاری نشان داده خواهد شد.

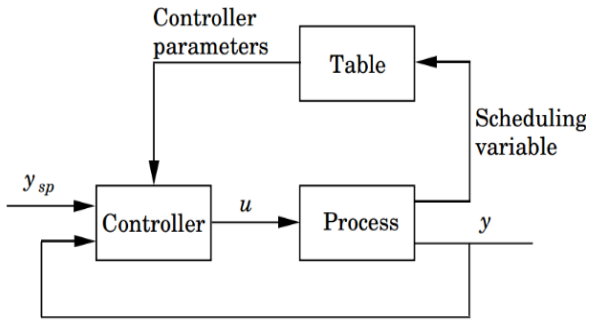
این مقاله در ادامه به چند بخش تقسیم می‌شود: در بخش دوم، مهار زمان‌بندی بهره به‌صورت اجمالی توضیح داده می‌شود، سپس در بخش سوم طراحی این روش مهاری با ساختار مهارکننده (PI) برای مهار هدررو پُرخوران مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی این روش بر روی پُرخوران نشان داده می‌شود. در انتها خلاصه و نتیجه‌گیری از کارهای انجام‌شده بیان خواهد گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مهار زمان‌بندی بهره

مهار زمان‌بندی بهره یکی از روش‌های مهار تطبیقی است که با فرآیندها و سامانه‌های غیرخطی، متغیر با زمان و یا سامانه‌هایی که دینامیک آن‌ها با نقاط کاری تغییر کند، سروکار دارد. در این روش، پیدا کردن متغیرهای قابل اندازه‌گیری (متغیرهای زمان‌بندی‌شده) که نشان‌دهنده‌ی تغییر در نقطهٔ کاری سامانه است، مسئله‌ای بسیار مهم به شمار می‌آید [۴].

در این روش با در نظر گرفتن چند محدوده کاری مناسب، می‌توان اقدام به طراحی مهارکننده نمود. ازاین‌رو نقاط کاری مناسبی در این محدوده‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس مهارکننده‌های متناظر با این نقاط طراحی شده و جدولی از ضرایب مهارکننده‌ها به دست آورده می‌شود. برای مهار سامانه در کل بازه، با استفاده از متغیرهای زمان‌بندی‌شده، می‌توان ضرایب مناسب را با استفاده از روش درون‌یابی خطی لاگرانژ[1] و جدول تهیه‌شده، انتخاب نمود. شمای روش مهاری زمان‌بندی بهره در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲: نمودار حلقهٔ مهاری سامانه با زمان‌بندی بهره

روش مهار زمان‌بندی بهره در هر لحظه به صورت زیر بیان شده است:

- اندازه‌گیری متغیرهای زمان‌بندی‌شده (متغیرهایی که وابستگی زیادی با نقاط کاری دارند.)
- انتخاب ضرایب مهارکننده با استفاده از روش خطی لاگرانژ و جدول تهیه شده.
- محاسبه و اعمال علامت مهاری جدید با توجه به ضرایب مهارکننده به‌روز شده.

در مهار زمان‌بندی بهره، طراحی ضرایب مهارکننده هریک از نقاط کاری، مسئلهٔ مهمی است. در این مقاله، دو روش طراحی ضرایب مهارکننده توضیح داده خواهد شد.

مهار PI زمان‌بندی بهره

در این قسمت، نحوهٔ مهار سامانه پُرخوران با استفاده از روش مهار زمان‌بندی بهره شرح داده خواهد شد. ورودی سامانه پُرخوران، هدررو بوده و خروجی آن فشار راهگاه ورودی است. در این مقاله در روش مهار زمان‌بندی بهره از مهارکننده PI بهره برده می‌شود. لذا متغیرهای دارای بیشترین همبستگی با دینامیک سامانه، مشخص شده و سپس متغیرهای مهارکننده طراحی می‌شوند.

[1] Lagrange linear interpolation method

برای طراحی متغیرهای مهارکننده، دو روش ارائه می‌شود. در روش اول با استفاده از سعی و خطا و با کمک نرم‌افزار GT-POWER متغیرهای مهارکننده مشخص خواهد شد. در روش دوم با توجه به نقاط کاری در نظر گرفته‌شده و با داشتن داده‌های ورودی-خروجی سامانه در این نقاط، با استفاده از ابزار شناسایی سامانه اقدام به شبیه‌سازی سامانه می‌شود. درنهایت از طریق روش‌های مرسوم همچون زیگلر-نیکولز و ... ضرایب مهاری تنظیم می‌شوند. پس از طراحی ضرایب مهارکننده PI در نقاط کاری، این ضرایب در یک جدول در نظر گرفته شده و روش مهار زمان‌بندی بهره برای سامانه پُرخوران پیاده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد، ابتدا باید متغیرهایی که پُرخوران نسبت به آن غیرخطی بوده، مشخص شود. در [۱۲]، نشان داده شده است که سامانه پُرخوران نسبت به فشار محیطی و مقدار دور موتور غیرخطی است. با مشخص شدن متغیرهای زمان‌بندی‌شده می‌توان به تعیین نقاط کاری و طراحی مهارکننده پرداخت.

هدف اصلی گروه طراحی در استفاده از پُرخوران، حفظ توان موتور در شرایط کاری مختلف پروازی است. لذا مقدار فشار مرجع باید کمی ضعیف‌تر از فشار دریا باشد. به همین دلیل بیشترین مقدار فشار ورودی هوا $0.97\ bar$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در ارتفاعات مختلف و محدودیت‌های پُرخوران، فشار ورودی به پُرخوران متفاوت است، لذا روند ورودی مرجع به‌صورت جدول (۱) توسط تیم طراحی بیان گردیده است.

جدول ۱: روش‌های ورودی مرجع

ورودی مرجع (فشار هوای ورودی مرجع)	زاویه دریچه هوای ورودی
۶۵۰ میلی بار	۲۵ > زاویه
بین ۶۵۰ میلی بار تا ۹۷۰ میلی بار	۵۰ > زاویه > ۲۵
۹۷۰ میلی بار	۵۰ < زاویه

۲-۲- شبیه‌سازی در نرم‌افزار GT-POWER

نرم‌افزار GT-POWER یک نرم‌افزار تحلیل یک‌بعدی است که کلیه متغیرهای عملکردی یک موتور احتراق داخلی را می‌توان از آن استخراج نمود. کلیه اجزای موتور در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و با داده‌های آزمون قابل راستی آزمایی است. در این مقاله شبیه‌سازی ایجادشده برای موتور پایه در شکل (۳) نشان داده‌شده است.

یک موتور ۶ استوانه دورانی با دریچه‌ها، راهگاه ورودی ورودی و خروجی، افشانه و دریچهٔ ورودی در نرم‌افزار GT-POWER ایجادشده است. در سه ارتفاع مختلف با شرایط فشار و دمای محیط متفاوت، موتور آزمون شده و نتایج آن در مقایسه با شبیه‌سازی ایجادشده در شکل‌های (۷-۵) ارائه گردیده است. عملکرد موتور بر اساس زاویه دریچهٔ ورودی در دو متغیر مهم فشار راهگاه ورودی ورودی و توان موتور، آزمون و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است.

پس‌ازآنکه اعتبار شبیه‌سازی موتور در شرایط دمایی و فشاری متفاوت سنجیده شد، با اضافه نمودن المان و نقشه پُرخوران، شبیه‌سازی تکمیل می‌شود (شکل (۴)). همچنین در شکل ۴ شبیه‌سازی ایجاد شده و رابط کاربری بین نرم‌افزار GT-POWER و سیمولینک نشان داده‌شده است. می‌توان در این شکل ارتباط بین موتور، پُرخوران و سیمولینک را مشاهده نمود.

متغیرهای موردنیاز برای مهار و همچنین چند متغیر مهم برای مشاهده رفتار موتور از نرم‌افزار GT-POWER اخذ و به سیمولینک فرستاده می‌شود. همچنین چند متغیر ورودی شبیه‌سازی موتور از سیمولینک به GT-POWER ارسال می‌شود که این متغیرها در جدول (۲) بیان گردیده‌اند.

جدول ۲: متغیرهای جابه‌جاشده بین GT-POWER و SIMULINK

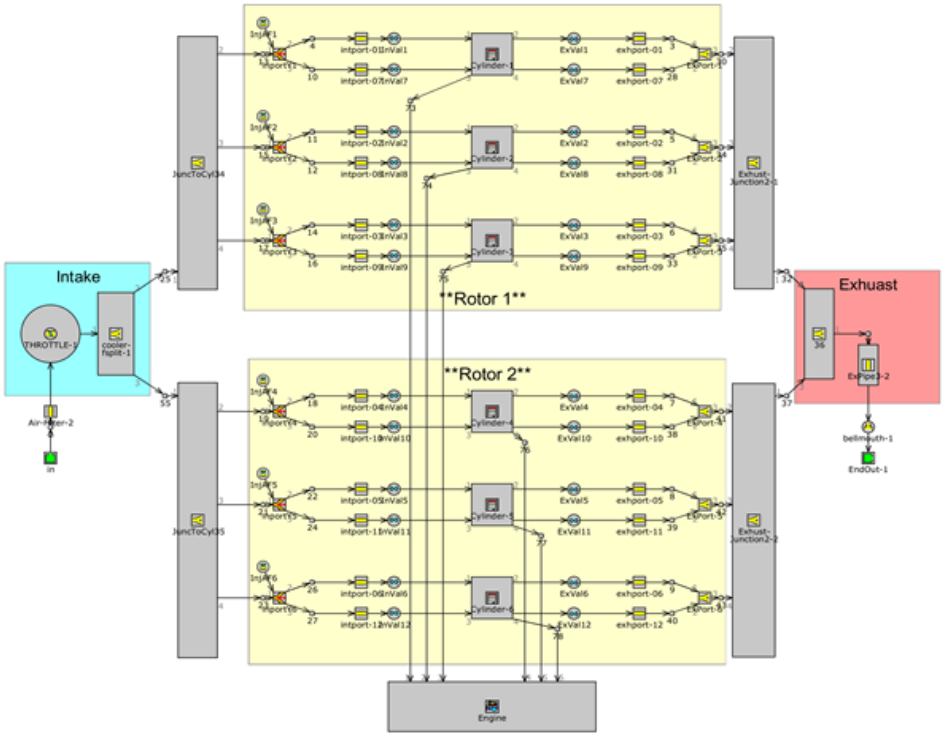
From GT-POWER to SIMULINK	From SIMULINK to GT-POWER
Brake Power	Throttle-Angle
BSFC	Propeller RPM
Torque	Environment Pressure
Fuel Mass Flow Rate	Environment Temperature
Exhaust Temperature	Altitude
Air Box Pressure	Waste Gate Position

۳- طراحی مهار کننده

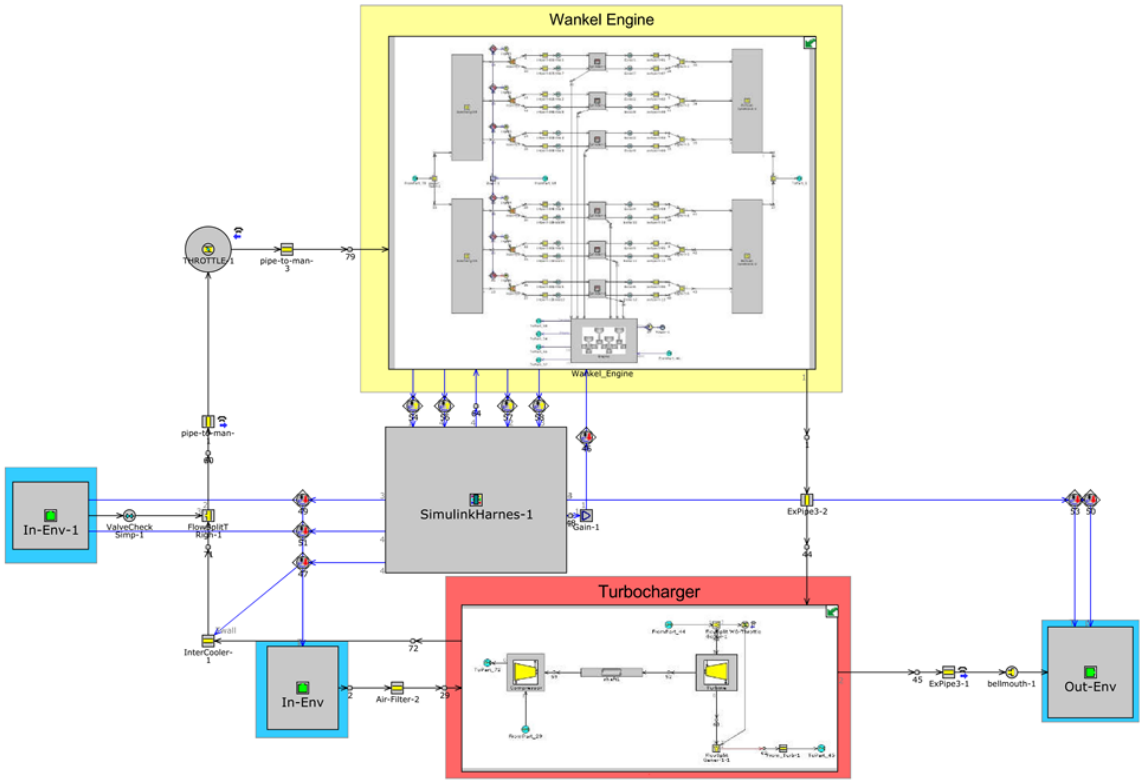
۱-۳- روش طراحی سعی و خطا به کمک شبیه‌سازی نرم‌افزاری GT-POWER

در این روش، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB که با شبیه‌سازی ایجادشده در نرم‌افزار GT-POWER به‌صورت هم‌زمان در ارتباط است، اقدام به انتخاب نقاط کاری مناسب و طراحی مهارکننده متناظر می‌شود. ابتدا در یک نقطهٔ خاص (نقطهٔ کاری اولیه) سعی می‌شود، مهارکننده (PI) به‌گونه‌ای طراحی شود که پاسخ سامانه حلقه بسته در این نقطه مناسب باشد. با در نظر داشتن این نقطه، نقطهٔ کاری سامانه تا جایی که پاسخ سامانه حلقه بسته نامطلوب شود، تغییر داده می‌شود. این بدان معناست که این مهارکننده دیگر برای این نقطه از سامانه مناسب نیست، لذا در نقطه جدید دوباره متغیرهای مهارکننده به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که پاسخ سامانه حلقه بسته در این نقطه مناسب گردد. این نقطه را نیز همانند نقطه قبل در نظر گرفته و دوباره همانند مسیر ذکر شده سعی در تغییر نقطه کار می‌شود. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام بازه‌های کاری سامانه، مهارکنندهٔ مناسبی داشته باشند. همان‌طور که توضیح داده شد، در انتخاب نقاط کاری، نقطه‌هایی انتخاب می‌شود که در آن نیاز به طراحی مهارکننده جدید وجود داشته باشد. سامانه پُرخوران مدنظر نیز همانند [۱۲] نسبت به دو عامل دور موتور و فشار محیطی غیرخطی است. بنابراین یک نقطه با دور موتور و دریچه پایین و فشار

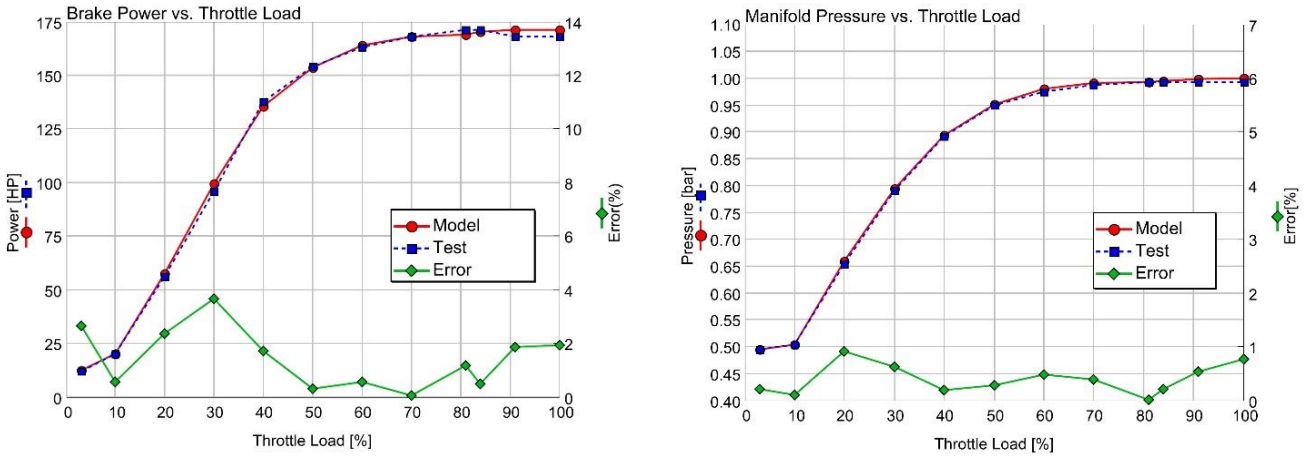
محیطی 0.85 bar در نظر گرفته و یک مهارکننده مناسب برای آن طراحی می‌شود، سپس شروع به تغییر نقطه کار نموده و هرجایی که مشاهده شود که خروجی سامانه با مهارکننده فعلی مناسب نیست، نقطهٔ کاری را تغییر می‌دهیم.



شکل ۳: تصویر شبیه‌سازی موتور پایه ایجادشده در نرم‌افزار

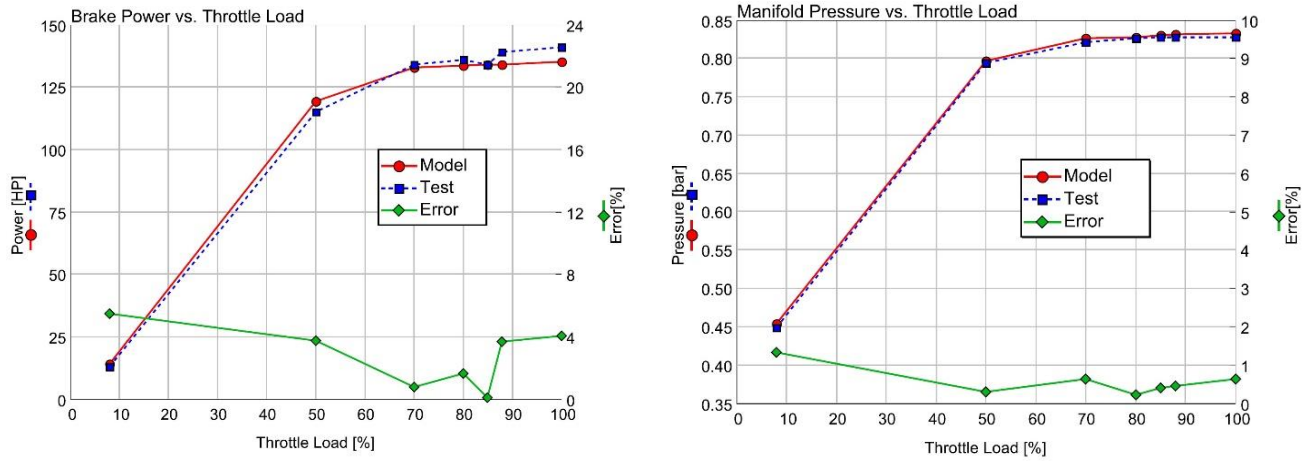


شکل ۴: تصویر شبیه‌سازی موتور تکمیل‌شده



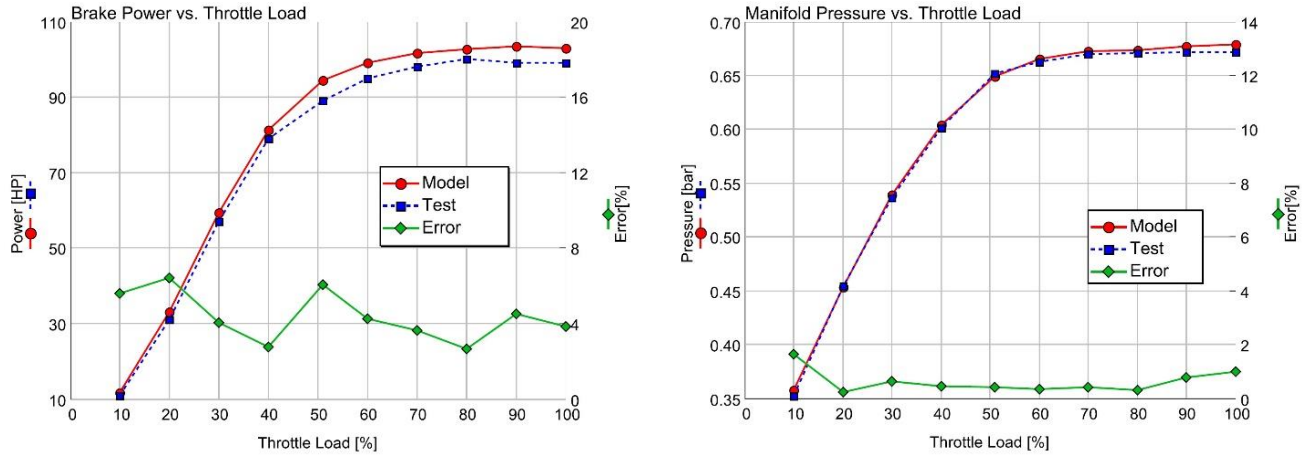
(ب) (الف)

شکل ۵: (الف) فشار راهگاه ورودی (ب) توان خروجی موتور در ارتفاع سطح دریا



(ب) (الف)

شکل ۶: (الف) فشار راهگاه ورودی، (ب) توان خروجی موتور در ارتفاع ۵۰۰۰ پا



(ب) (الف)

شکل ۷: (الف) فشار راهگاه ورودی، (ب) توان خروجی موتور در ارتفاع ۱۱۰۰۰ پا

مثلاً اگر نقطهٔ شروع و مهارکننده مناسب متناظر با آن به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده باشد:

$$Point\ 1 \rightarrow \begin{cases} RPM = 4200 \\ Throttle = 51 \\ P_{amb} = 0.85 \end{cases}$$

$$PI\ contoller \rightarrow \begin{cases} P = -30 \\ I = -100 \end{cases}$$

خروجی سامانه (فشار راهگاه ورودی) به‌صورت شکل (۸) است. حال اگر نقطهٔ کاری به نقطه ۲ تغییر یابد و مهارکننده، همان مهارکننده قبلی در نظر گرفته شود، آنگاه خروجی فشار راهگاه ورودی به‌صورت شکل (۹) می‌شود.

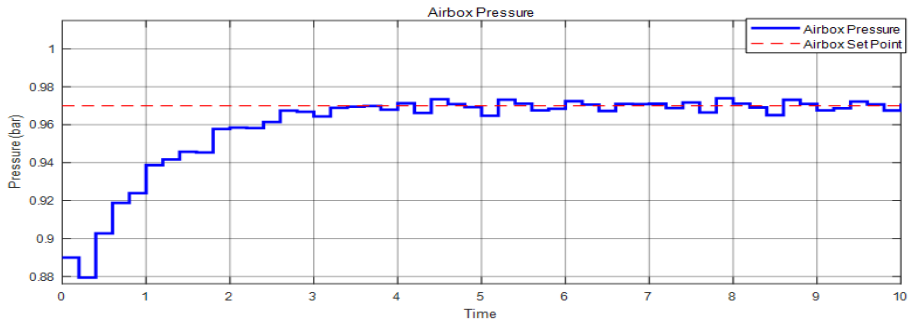
$$Point\ 2 \rightarrow \begin{cases} RPM = 5900 \\ Throttle = 80 \\ P_{amb} = 0.4 \end{cases}$$

$$PI\ contoller \rightarrow \begin{cases} P = -30 \\ I = -100 \end{cases}$$

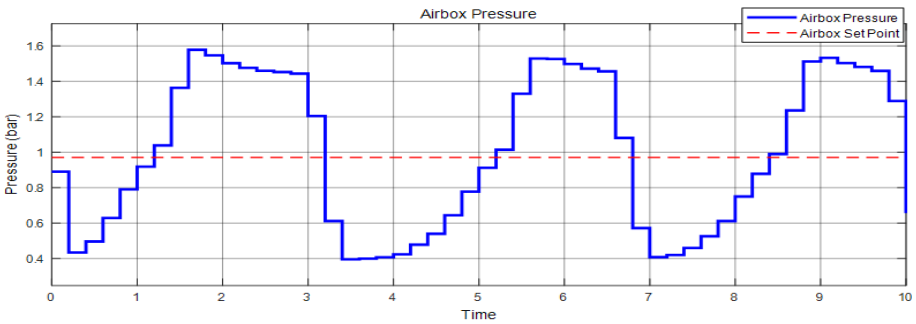
همان‌طور که مشاهده می‌شود، خروجی فشار راهگاه ورودی در نقطه ۲ و مهارکننده قبلی، جواب مناسبی را ندارد، لذا باید، اقدام به طراحی مهارکننده دیگری کرد. لذا ضرایب مهارکننده PI به صورت $P = -120, I = -40$ تنظیم می‌شود که در این صورت، خروجی فشار راهگاه ورودی به‌صورت شکل (۱۰) در می‌آید. به همین روش، سعی در انتخاب مهارکننده‌هایی می‌شود که کل بازه متغیرهای یادشده را پوشش دهند. جدول (۳) ضرایب مهارکننده‌های طراحی‌شده را در بازه کارایی خود نشان می‌دهد.

جدول ۳: بازه نقاط کاری و ضرایب مهارکننده مؤثر

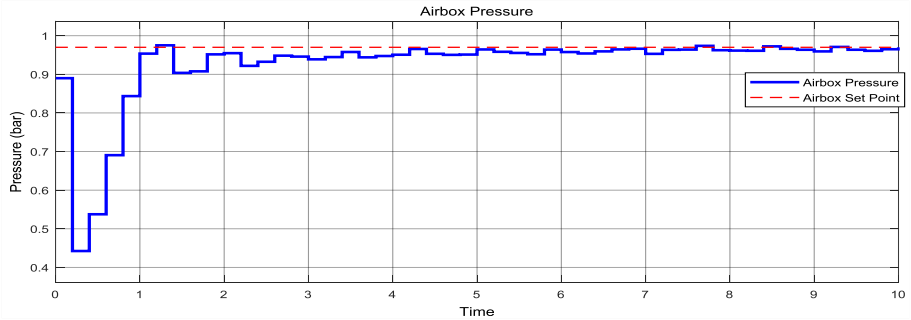
بازه نقطهٔ کاری	$P_{amb} > 0.5$	$P_{amb} \leq 0.5$
$RPM \leq 5300$	$P = -30,$ $I = -100$	$P = -120,$ $I = -80$
$RPM > 5300$	$P = -100,$ $I = -100$	$P = -120,$ $I = -40$



شکل ۸: خروجی فشار راهگاه ورودی در نقطه ۱



شکل ۹: خروجی فشار راهگاه ورودی در نقطه ۲ و با مهارکننده طراحی‌شده برای نقطه ۱



شکل ۱۰: خروجی فشار راهگاه ورودی در نقطه ۲ با مهارکننده اصلاح‌شده

بنابراین مراحل طراحی مهار کننده PI در روش طراحی به کمک سعی و خطا به صورت زیر است:

- انتخاب یک نقطهٔ کاری به دلخواه
- تنظیم ضرایب مهار کننده PI به صورت نرم افزار در حلقه (این کار به صورتی تقریبی و دستی صورت می پذیرد.)
- تغییر نقطهٔ کاری تا زمانی که عملکرد سامانه نسبت به مهار کننده فعلی نامطلوب گردد.
- برگشت به گام ۲

۲-۳- روش طراحی با استفاده از شناسایی سامانه و به کمک شبیه‌سازی نرم‌افزاری GT-POWER

یکی از معایب روش اول برای تعیین مهارکننده، استفاده از سعی و خطا است. فرض کنیم داده‌هایی از سامانه در دسترس است، آنگاه می‌توان با استفاده از ابزار شناسایی سامانه، اقدام به پیدا کردن شبیه‌سازی و سپس اقدام به طراحی مهارکننده نمود.

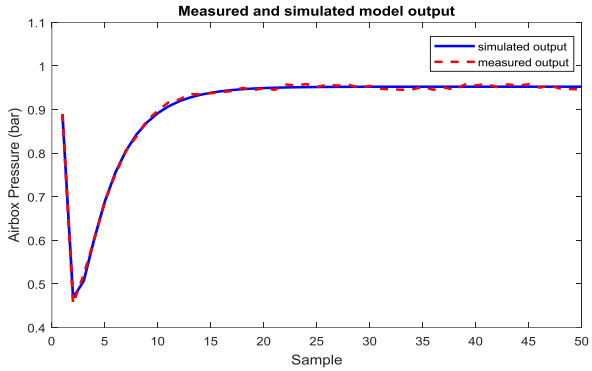
با توجه به اطلاعات پیش‌زمینه‌ای که در مورد سامانه پُرخوران وجود دارد، سامانه را در ۴ نقطهٔ کاری که در جدول (۴) نشان داده‌شده است، در نظر گرفته و سپس با کمک شناسایی سامانه حلقه باز و یا حلقه بسته که شرح این روش‌ها در [۱۳] توضیح داده‌شده است، اقدام به شناسایی سامانه می‌شود.

جدول ۴: نقاط کاری در نظر گرفته‌شده برای سامانه پُرخوران

1) $RPM = 4200$, $Throttle = 51$, $P_{amb} = 0.85$	3) $RPM = 4800$, $Throttle = 51$, $P_{amb} = 0.4$
2) $RPM = 5900$, $Throttle = 80$, $P_{amb} = 0.85$	4) $RPM = 5900$, $Throttle = 80$, $P_{amb} = 0.4$

برای شناسایی سامانه از ابزار شناسایی سامانه MATLAB استفاده‌شده است. با استفاده از شناسایی سامانه با ساختار مهاری تابع تبدیل گسسته، اقدام به شبیه‌سازی سازی سامانه در نقاط کاری مختلف شده است. همچنین کیفیت شناسایی سامانه به‌عنوان مثال در نقطهٔ کاری ۴، به‌صورت شکل (۱۱) است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی شناسایی‌شده در نقطه ۴ مقدار دقت بالایی را دارا است. در جدول (۵) شبیه‌سازی‌های شناسایی‌شده در ۴ نقطه گفته‌شده با مقدار خطای بین شبیه‌سازی و سامانه در نقطهٔ مزبور نشان داده شده است.



شکل ۱۱: خروجی واقعی و شبیه‌سازی شناسایی‌شده در نقطهٔ کاری ۴

با مشخص شدن نقاط کاری، می‌توان با استفاده از ابزارهای مختلف طراحی مهارکننده PI برای سامانه‌های خطی، مهارکننده‌های مناسب را طراحی نمود. در اینجا به برای سادگی، مهارکننده‌های قسمت قبل برای صحت سنجی استفاده شده و درنهایت از همان مهارکننده‌ها، برای مهار سامانه در تمامی بازه‌ها استفاده خواهد شد.

لذا مراحل طراحی مهار کننده PI در روش طراحی به کمک شناسایی سامانه به صورت زیر است:

- بدست آوردن شبیه‌سازی‌های متناظر با نقاط کاری، با کمک ابزار شناسایی سامانه
- طراحی مهارکننده با توجه به روش‌های مرسوم هم‌چون زیگلر نیکولز و یا روش‌های کمکی ابزار متلب هم‌چون PID Tuner
- بررسی صحت مهارکننده‌ها در نقاط کاری مزبور

جدول ۵: شبیه‌سازی‌های شناسایی‌شده در نقاط کاری مشخص‌شده

شماره نقطهٔ کاری	شبیه‌سازی شناسایی‌شده	MSE	FPE
۱	$\frac{0.02408z^{-1}}{1-0.5868z^{-1}+0.08389z^{-2}}$	$4.80e-6$	$5.85e-6$
۲	$\frac{0.01492z^{-1}}{1-0.5862z^{-1}+0.06143z^{-2}}$	$6.75e-6$	$8.22e-6$
۳	$\frac{0.04419z^{-1}}{1-0.9399z^{-1}+0.1259z^{-2}}$	$2.03e-5$	$2.47e-5$
۴	$\frac{0.01504z^{-1}}{1-0.9405z^{-1}+0.1458z^{-2}}$	$2.73e-5$	$3.32e-5$

٤- شبیه‌سازی

در بخش گذشته صحت شبیه‌سازی موتور نشان داده شد، همچنین روش‌هایی نیز برای طراحی مهارکننده برای مهار پُرخوران در بازه‌های مختلف کاری آن بیان شد، حال باید با داشتن این مهارکننده‌ها اقدام به

مهار پُرخوران در تمامی بازه‌ها کرده و عملکرد سامانهٔ مهاری حلقه بسته را به‌صورت کلی مشاهده نمود.

به همین منظور شبیه‌سازی شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار GT-POWER را به سیمولینک متصل نموده و سپس روش مهار زمان‌بندی بهره در محیط سیمولینک اجرا می‌شود. شمای کلی برنامه سیمولینک در شکل (۱۵) نشان داده‌شده است. در این شکل، شبیه‌سازی شبیه سازی شده در GT-POWER و ساختار مهاری که شامل بانک مهاری و ناظر مهاری که وظیفه انتخاب متغیرهای مهار کننده را دارد، قابل مشاهده است. همانطور که در قسمت‌های قبل بیان گردید، شبیه‌سازی موتور با صحت سنجی و راستی آزمایی مناسب در نرم افزار GT-POWER پدید آمده و سپس با محیط نرم‌افزار MATLAB مرتبط گردیده است و نیز روش طراحی مهار کننده‌ها و روش مهار بیان شده است.

منطق انتخاب مهارکننده نیز با توجه به مقادیر RPM، P_{amb} و طبق جدول (۳) در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای بررسی عملکرد روش مهاری، نقاط کاری جدول (۶) در لحظات مختلف زمانی برای سامانه در نظر گرفته‌شده و سپس خروجی فشار راهگاه ورودی و زاویه هدررو در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمایش داده‌شده‌اند.

شکل (۱۲) نشان‌دهنده این است که ناظر موجود در مهار زمان‌بندی بهره، هنگامی‌که نقطهٔ کاری عوض می‌شود، به‌صورت آنی متغیرهای مهاری را جایگزین می‌کند و این موضوع سبب می‌شود که مهارکننده مناسبی سریعاً با شبیه‌سازی موتور در نقطهٔ کاری جدید تطبیق گردد. شکل (۱۳) عملکرد مهارکننده‌ها را در هر نقطهٔ کاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عملکرد هر مهارکننده در بازه مربوط به خود مناسب است، البته در زمان تغییر نقطهٔ کاری فراجهش یا فروجهش‌هایی مشاهده می‌شود که این موضوع به مقدار متغیرهای موتور مربوط می‌شود؛ به عنوان مثال در زمان $t = 40s$ چون فشار محیط از $0.85\ bar$ به $0.45\ bar$ به‌صورت ناگهانی تغییر پیدا می‌کند، این امر سبب افت شدیدی در فشار هوای ورودی به موتور می‌شود و چون پُرخوران با همان سرعت قبلی در حال کار کردن است، به طور طبیعی نمی‌تواند فشار هوای قبلی را در اختیار موتور قرار دهد، به همین دلیل با توجه به شکل (۱۴) سامانهٔ مهاری در این لحظه سعی می‌کند که هدررو را ببندد تا تمام شار هوای خروجی از گَردا گذشته و سرعت پُرخوران بیشتر شود و این امر موجب می‌شود تا هوای فشرده‌تری در اختیار موتور قرار بگیرد.

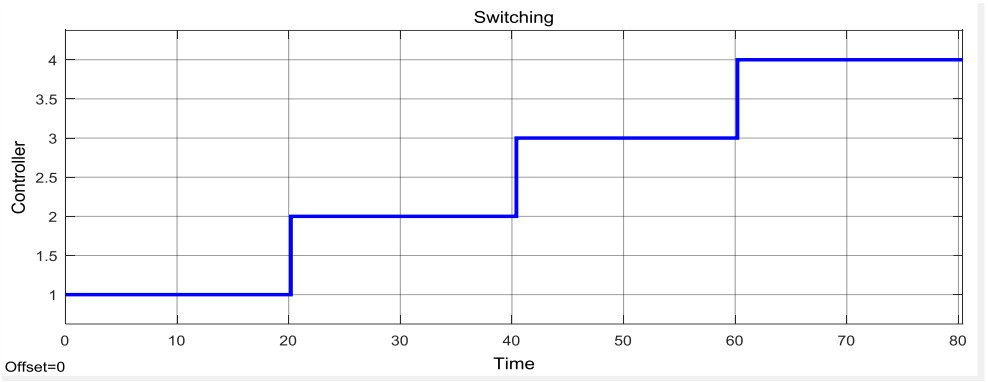
در لحظاتی که فشار محیط به $0.45\ bar$ تغییر پیدا کرده است، مقدار نوسانات کوچکی در فشار هوای راهگاه ورودی مشاهده می‌شود که این موضوع را می‌توان به هدررو ارتباط داد، ازآنجایی‌که در این شبیه‌سازی قصد شده است.تا عملکرد واقعی موتور نشان داده شود، لذا در ورودی هدررو از بلوک fix استفاده شده تا مقدار عبارت صحیحی را در اختیار هدررو قرار گیرد، زیرا در عمل، هدررو از طریق بخش‌هایی همچون سرو موتور باز و بسته می‌شود.

ازآنجایی‌که در فشار هوای محیطی ضعیف برای اینکه به ورودی مرجع دست پیدا کنیم باید هدررو مقدار کمی باز باشد، لذا خطا به وجود آمده به دلیل استفاده از بلوک fix و یا خطای انباشته‌شده عددی، باعث می‌شود که هدررو با مقدار بیشتری تغییر کند و درنتیجه این موضوع باعث به وجود آمدن نوسانات ریز در خروجی می‌شود و این موضوع در فشارهای محیطی بالاتر، کمتر رخداده است.

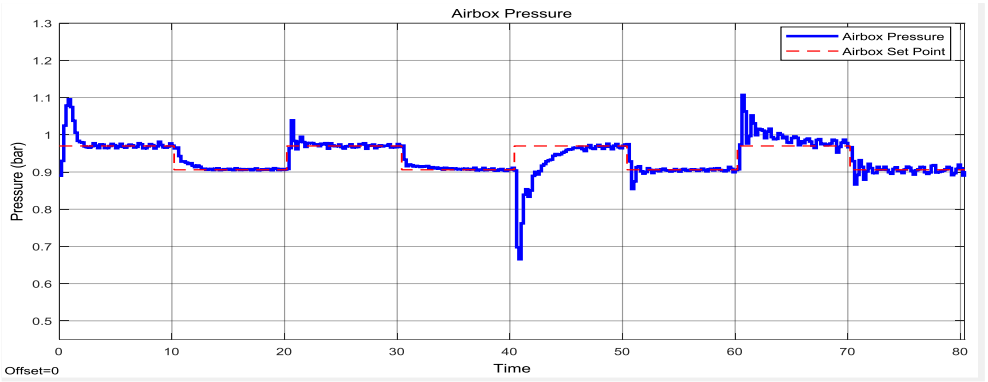
لازم به ذکر است که انتخاب این نقاط با توجه به جدول ۴ است، به عبارتی این نقاط به گونه ای در نظر گرفته شده‌اند، که با تغییر از یک نقطه به نقطه دیگر، عملکرد سامانهٔ مهاری نامطلوب گردد.

جدول ۶: تغییرات نقاط کاری در زمان‌های مختلف

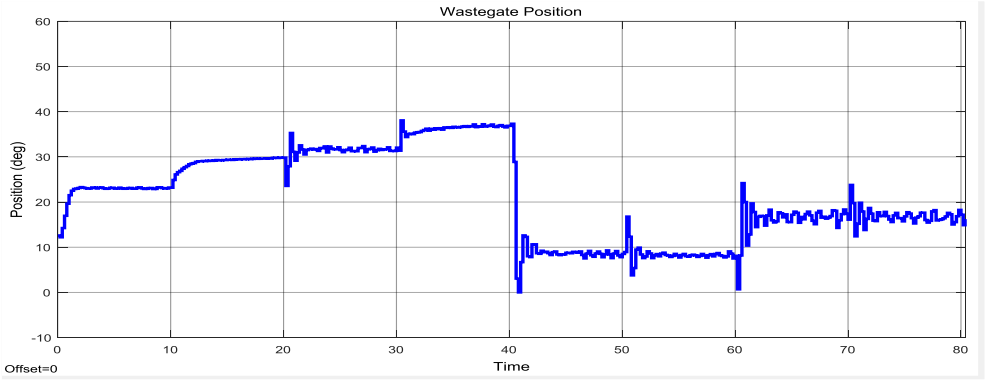
زمان	نقطهٔ کاری	زمان	نقطهٔ کاری
$t = 0$	$RPM = 4500,\ Throttle = 90,\ P_{amb} = 0.85\ bar,\ T = 310$	$t = 40$	$RPM = 4800,\ Throttle = 85,\ P_{amb} = 0.45\ bar,\ T = 245$
$t = 10$	$RPM = 4500,\ Throttle = 45,\ P_{amb} = 0.85\ bar,\ T = 310$	$t = 50$	$RPM = 4800,\ Throttle = 45,\ P_{amb} = 0.85\ bar,\ T = 245$
$t = 20$	$RPM = 5900,\ Throttle = 80,\ P_{amb} = 0.85\ bar,\ T = 310$	$t = 60$	$RPM = 6200,\ Throttle = 85,\ P_{amb} = 0.45\ bar,\ T = 245$
$t = 30$	$RPM = 5900,\ Throttle = 45,\ P_{amb} = 0.85\ bar,\ T = 310$	$t = 70$	$RPM = 6200,\ Throttle = 45,\ P_{amb} = 0.45\ bar,\ T = 245$



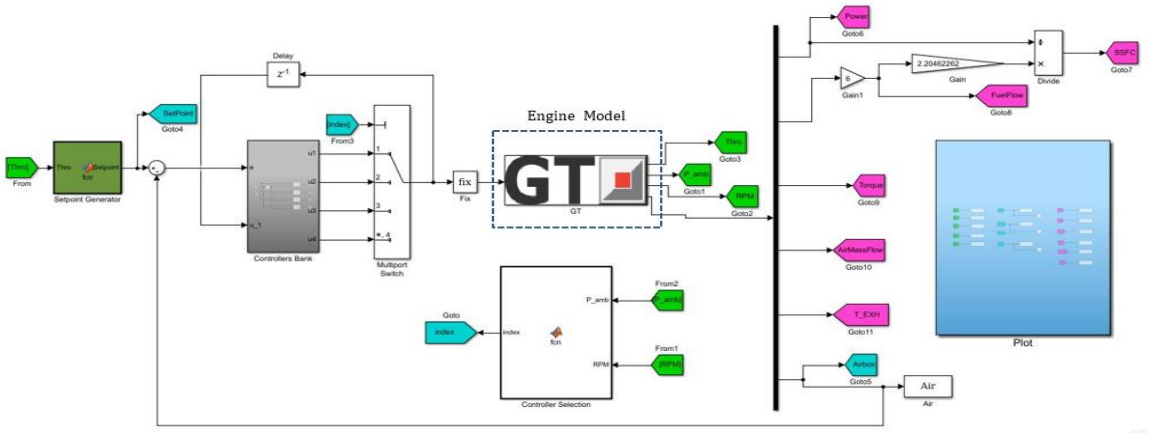
شکل ۱۲: کلیدزنی مهار زمان‌بندی بهره در نقاط کاری مختلف



شکل ۱۳: خروجی فشار راهگاه ورودی در نقاط کاری مختلف



شکل ۱۴: زاویه هدررو موتور در نقاط کاری مختلف



شکل ۱۵: شماتیک برنامه شبیه‌سازی‌شده در سیمولینک

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مهار هدررو پُرخوران به وسیله روش مهار زمان‌بندی بهره مورد بررسی قرار گرفت. مهار زمان‌بندی بهره به عنوان یکی از روش‌های مرسوم برای مهار سامانه‌هایی است که نسبت به نقطه کار غیرخطی یادشده و متغیرهای زمان‌بندی در این روش نقش مهمی دارند.

از آن‌جایی که بیشتر پُرخوران‌ها نسبت به مقدار دور موتور و فشار هوای محیط غیرخطی هستند، لذا این متغیرها به‌عنوان متغیرهای زمان‌بندی در پُرخوران به‌حساب می‌آیند. در این مقاله شبیه‌سازی نرم‌افزاری در محیط نرم‌افزار GT-POWER با اعتبارسنجی مناسبی برای شبیه‌سازی یک موتور پُرخوران نشان داده شد و سپس با طراحی مهارکننده‌های محلی یا پایگاه مهارکننده برای روش مهار زمان‌بندی بهره با اتکای به شبیه‌سازی نرم‌افزاری و نه شبیه‌سازی ریاضیاتی، اقدام به مهار پُرخوران در تمامی بازه‌ها شد. وابستگی شبیه‌سازی موتور به دور موتور و ارتفاع از سطح دریا در این مقاله نشان داده شد که این کار با طراحی یک مهار کننده مطلوب در یک نقطه و سپس تغییر نقطهٔ کاری و مشاهده اثر نامطلوب بر عملکرد سامانه صورت پذیرفت.

لذا برای این کار چندین شبیه‌سازی در نقاط مختلف در نظر گرفته شد که این شبیه‌سازی‌ها با مقدار خطای کم (MSE و FPF)، صحت شبیه‌سازی ها را در این نقاط نشان دادند. تغییرات ناگهانی در ورودی موتور باعث افت عملکرد زیاد در ابتدا می‌شد اما با این وجود سامانهٔ مهاری توانسته در مرحله اول سامانه حلقه بسته را پایدار کرده و در نهایت فشار مورد نیاز را فراهم سازد.

در انتها عملکرد مطلوب روش مهاری با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بررسی شد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های طراحی سامانهٔ مهار در محیط MATLAB این است که می توان روش مهاری را توسعه داد و بین روش‌های مهاری مختلف مقایسه‌ای صورت داد.

همچنین نرم‌افزار MATLAB این قابلیت را دارد که به سخت‌افزار متصل شده و مهار کننده‌های طراحی شده را بر روی آن بررسی نماید. بنابراین با توجه به آنچه که گفته شد، می‌توان در کارهای آتی به توسعهٔ روش‌های مهار پرداخت و عملکرد روش‌های مهار را مقایسه کرد و نیز می‌توان روش بیان شده در این مقاله را در کارهای آتی به صورت سخت‌افزار در حلقه اجرا نمود تا مقدار صحت روش طراحی بیان شده، بررسی شود.

اهمیت این مقاله را می‌توان در طراحی روش مهاری، پیش از اعمال آن به روش سخت‌افزار در حلقه دانست. با طراحی مهارکننده در نرم‌افزار، متغیرها و ضرایب مهاری طراحی می‌شوند، سپس می‌توان مهارکننده طراحی شده را در سخت‌افزار در حلقه اعمال نمود و اثر آن را بر روی سامانه واقعی مشاهده کرد.

مراجع و منابع

[1] Eriksson, L. and L. Nielsen, Modeling and control of engines and drivelines. 2014: John Wiley & Sons

[2] Baines, N.C., Fundamentals of turbocharging. Vol. 1. 2005: Concepts NREC White River Junction, Vermont.

[3] Capobianco, M. and S. Marelli, Waste-gate turbocharging control in automotive SI engines: effect on steady and unsteady turbine performance. 2007, SAE Technical Paper.

[4] Åström, K.J. and B. Wittenmark, Adaptive control. 2013: Courier Corporation.

[5] Bemporad, A., et al., Model predictive control of turbocharged gasoline engines for mass production. 2018, SAE Technical Paper.

[6] Santillo, M. and A. Karnik. Model predictive controller design for throttle and wastegate control of a turbocharged engine. in 2013 American Control Conference. 2013. IEEE.

[7] Nguyen, T., J. Lauber, and M. Dambrine. Switching fuzzy control of the air system of a turbocharged gasoline engine. in 2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 2012. IEEE.

[8] Qiu, Z., et al., Nonlinear internal model controller design for wastegate control of a turbocharged gasoline engine. Control Engineering Practice, 2016. 46: p. 105-114.

[9] Moulin, P. and J. Chauvin, Modeling and control of the air system of a turbocharged gasoline engine. Control Engineering Practice, 2011. 19 :(۳)p. 287-297.

[10] Karnik, A.Y. and M. Jankovic. IMC based wastegate control using a first order model for turbocharged gasoline engine. in 2012 American Control Conference (ACC). 2012. IEEE.

[11] Thomasson, A., et al., Wastegate actuator modeling and model-based boost pressure control. IFAC Proceedings Volumes, 2009. 42(26): p. 87-94.

[12] Zhang, H., et al., Model-based design of a variable nozzle turbocharger controller. International Journal of Automotive Technology, 2011. 12(2): p. 173-182.

[13] Nelles, O., Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. 2013: Springer Science & Business Media.

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Gain Scheduling Waste-gate Control of Turbocharger Using MATLAB & GT-POWER

S. A. Sharifi[1*], P. Yousefi[2], S. Mirzali[3], E. Abbasi[4]

[1] *M.Sc. of Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, sharifi_sa@mech.sharif.edu*
[2] *M.Sc. of Electrical Engineering Department, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, kppusefi@ihu.ac.ir*
[3] *M.Sc. of Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, kpmirzali@ihu.ac.ir*
[4] *M.Sc. of Aerospace Engineering Department, Science and Technology University, Tehran, Iran, abbasi_e@alumni.iust.ac.ir*
**Corresponding Author*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 11 November 2019
Accepted: 18 February 2020

Keywords:
Turbocharger
Gain scheduling control
Turbocharger control
System identification
MATLAB
GT-POWER.

ABSTRACT

Turbochargers are used to increase engine manifold air pressure. Control of intake manifold pressure is crucial issue which is done through the speed control of turbocharger, but since it is difficult to directly control the speed of the turbocharger, it is done indirectly through a gate that called the waste gate, which is located in the engine outlet and turbocharger's turbine inlet. One of the most common control methods for control of turbocharger is the gain scheduling control. This method design in parameter look-up table, supervisor and system subsection to control turbocharger performance. The performance of control loop can be evaluated with accuracy of considered model and designed controller. In this paper, the engine model with the turbocharger has been created in the GT-POWER software, then, by defining the input and output parameters in the GT-POWER model, the model is coupled with MATLAB software to controller design. In the next step, two methods have been developed to design the controllers for the gain scheduling control method. Eventually, effectiveness of turbocharger control using gain scheduling control is shown.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.