



کاربرد رویکرد پایش پروفایل در کنترل فرایندهای تولید موتور: مطالعه موردی تحلیل مشخصه BSFC

مجید کارگری دهکردی^{۱*}، منصور نیکجو^۲، جواد نوروژی^۳، محمود مهدیزاده^۴

m.kargari@ikco.ir
m_nikjoo@ip-co.com
j_nourozi@ip-co.com
m_mahdizadeh@ip-co.com

۱ کارشناس ارشد شرکت تحقیق، طراحی، تولید موتور ایران خودرو
۲ کارشناس ارشد شرکت تحقیق، طراحی، تولید موتور ایران خودرو
۳ کارشناس تضمین کیفیت شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو
۴ کارشناس تضمین کیفیت شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو

چکیده

کنترل فرایند آماری بعنوان مهمترین ابزار کیفی فرایندهای تولید مطرح بوده و تمرکز پژوهشگران بر روی توسعه و بهبود نمودارهای کنترلی بسیار چشمگیر بوده است. یکی از شاخه‌های این پژوهش‌ها توسعه مفهوم پایش پروفایل است. در این حالت به جای اینکه یک یا چند مشخصه کیفی کنترل شود یک رابطه رگرسیونی بین متغیر پاسخ و متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده و در طول زمان پایش میشود. جذابیت استفاده از این تکنیک به همراه گستردگی و تنوع جنبه‌ها و محدودیت‌های مختلف آن سبب استفاده حداکثری از روش‌ها و تکنیک‌های متنوع در حوزه علوم آمار، ریاضی، داده‌کاوی، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی... شده است. این مقاله ضمن معرفی بعضی زمینه‌های بالقوه در فرایندهای تولید انبوه موتور احتراق داخلی، استفاده از رویکرد پایش پروفایل را در یک مثال کاربردی از یک مشخصه مهم موتور بررسی می‌نماید. نتایج این بررسی نشان دهنده قابلیت این ابزار برای تحت کنترل داشتن این مشخصه در فرایند تولید انبوه موتور خودرو میباشد.

کلیدواژه‌ها: نمودارهای کنترلی، پایش پروفایل، پروفایل چند متغیره، نمودارهای مشخصه‌های محصولی موتور، مصرف ویژه سوخت ترمزی

Application of Profile Monitoring in Engine Manufacturing Process Control: A Case Study of BSFC Characteristic Analysis

Majid kargari Dehkordi^{1*}, Mansor Nikjoo², Javad Nourozi³, Mahmood Mahdizadeh⁴

¹Iran Khodro Powertrain Company (IPC)
²Iran Khodro Powertrain Company (IPC)
²Iran Khodro Powertrain Company (IPC)
²Iran Khodro Powertrain Company (IPC)

m.kargari@ikco.ir
m_nikjoo@ip-co.com
j_nourozi@ip-co.com
m_mahdizadeh@ip-co.com

Abstract

Statistical Process Control (SPC) has long been recognized as the most important quality tool in manufacturing processes, and researchers have devoted considerable attention to the development and enhancement of control charts. One prominent branch of this research involves the advancement of profile monitoring. In this approach, rather than monitoring one or several quality characteristics, a regression relationship between a response variable and one or more explanatory variables is monitored over time. The appeal of this technique, coupled with its broad applicability and the diversity of its aspects and constraints, has led to the extensive utilization of various methods and techniques from statistics, mathematics, data mining, machine learning, artificial intelligence, and related fields. This paper, after introducing several potential applications in mass production processes of internal combustion engines, investigates the use of profile monitoring through a practical case study involving a critical engine characteristic. The results demonstrate the capability of this approach to effectively maintain control over the characteristic during mass automotive engine production.

Keywords: Control charts, profile monitoring, multivariate profile, engine product characteristic charts, brake specific fuel consumption



مقدمه

در کنترل فرآیند آماری^۱، عموماً کیفیت یک فرآیند یا محصول به وسیله توزیع یک متغیر تصادفی و یا یک بردار، که نشان دهنده چند مشخصه کیفی وابسته بهم است، پایش می‌شود در این حالت، این نوع مشخصه کیفی بوسیله یک نمودار کنترلی پایش می‌شود اما در بعضی از شرایط، کیفیت یک فرآیند یا محصول می‌تواند بوسیله رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ و یک یا چندین متغیر مستقل توصیف شود در ادبیات کنترل کیفیت آماری به این رابطه، پروفایل گفته می‌شود از آنجایی که پروفایل‌ها نسبت به روش‌های معمول بشکل واقعی تری مشخصه کیفی محصول را به تصویر می‌کشد، پایش پروفایل‌ها بعنوان یک تکنیک مکمل و یا جایگزین مورد توجه پژوهشگران بوده است. بصورت خلاصه میتوان گفت در پایش پروفایل رابطه رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده و در طول زمان موردارزیابی و پایش قرار می‌گیرد. اگرچه محدودیت‌های استفاده از این روش، کاربرد آن را برای تمامی حوزه‌های تولیدی غیرممکن نموده، استفاده از آن در صنایع مختلف روند رو به رشدی داشته است.

در صنایع خودرو و بالاخص تولید موتور خودرو نیز پژوهش‌هایی صورت گرفته است اگرچه تاکنون بصورت عملی در شرکتهای ایرانی پیاده سازی و اجرایی نشده است.

همانگونه که ذکر شد پروفایل رابطه متغیرهای پاسخ با متغیر مستقل می‌باشد. این رابطه می‌تواند خطی، غیرخطی، چند متغیره و... باشد. تلاقی نوع پروفایل‌ها و محدودیتها و روش‌های حل مساله، شاخه

های مختلف پژوهشی را در این زمینه بوجود آورده است: [۱]

۱- زمینه‌های پایش پروفایل‌ها ۲- نوع پروفایل ۳- نوع فرایندهای مرتبط ۴- نوع متغیرهای پاسخ ۵- فاز مرتبط ۶- معیار ارزیابی ۷- کاربردهای عملی، از جمله مواردی است که باعث ایجاد شاخه‌های مختلف پژوهش در حوزه پایش پروفایل شده است.

بیشترین فعالیتهای علمی پژوهشگران در زمینه پایش پروفایل معطوف به طراحی ساختار آماری و مدلسازی بوده است. هدف اصلی رویکرد پایش پروفایل، بررسی سازگاری و ثبات یک فرآیند در طول زمان با استفاده از روش‌های آماری است. طرح اقتصادی - آماری مدل پایش پروفایل، برآورد نقطه تغییر در نمودارهای کنترلی، تجزیه و تحلیل قابلیت فرایند و تعریف شاخص‌هایی در این زمینه برای پروفایل‌ها، از جمله زمینه‌های دیگر پژوهش‌ها در حوزه پایش پروفایل بوده است.

نوع پروفایل‌ها نیز به رابطه متغیرهای مستقل و متغیرهای پاسخ مربوط میشود که این رابطه میتواند بعنوان پروفایل خطی، پروفایل

غیرخطی، پروفایل خطی تعمیم یافته^۲ و غیرپارامتریک دسته‌بندی گردد.

فرایندهای مرتبط نیز به مفروضات مساله از جمله نرمال بودن توزیع عناصر خطا و همچنین استقلال عناصر خطا (عدم وجود خودهمبستگی) اشاره دارد که با توجه به عدم تحقق آنها در بیشتر موارد، زمینه مطالعات در تاثیر عدم وجود این فرض در کارایی مدل، کاهش تاثیرات منفی نبود شرط استقلال در کارایی مدل‌ها و نمودارهای کنترلی و نهایتاً از بین بردن تاثیرات منفی این موارد بوده است.

متغیر پاسخ تک متغیره یا چند متغیره و همچنین فازی بودن آن نیز انواع مختلف متغیرهای پاسخ را بیان می‌کند.

مانند سایر روشهای کنترل فرایند آماری و نمودارهای کنترل، رویکرد پایش پروفایل‌ها نیز در ادبیات موضوع می‌تواند برای مراحل فاز I یا فاز II طراحی شوند. هدف اصلی از تجزیه و تحلیل فاز I بررسی ثبات آماری فرآیند با استفاده از مجموعه داده‌های گذشته و برآورد پارامترهای رگرسیون با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های بدون ایراد است. براساس اطلاعات موجود در فاز I، هدف اصلی تجزیه و تحلیل فاز II تشخیص آشفتگی‌های فرآیند در اسرع وقت قبل از تولید تعداد زیادی واحد معیوب است.

تعریف و استفاده از معیارهایی برای ارزیابی تواناییهای مدل طراحی شده در هر دو فاز بعنوان مرحله پایانی برای تایید و صحت‌گذاری مدلها محسوب می‌شود. با توجه به طراحی مدل‌های مختلف برای یک نوع پروفایل و لزوم مقایسه و ارزیابی عملکرد آنها، این شاخه از مبحث پایش پروفایل دارای اهمیت خاصی خواهد بود و تمامی محققان برای اطمینان از کارایی مدل‌های خود این معیارها را مورد استفاده خود قرار داده‌اند.

کاربردهای عملی نیز یکی از زمینه‌های جالب توجه در مطالعات پایش پروفایل بوده است. اگرچه همچنان که ذکر گردید پایش پروفایل نمی‌تواند در بعضی از فرایندهای تولید مورد استفاده قرار گیرد ولی استفاده روزافزون از آن در صنایع مختلف لزوم آشنایی با آن را برای کارشناسان و علاقمندان مباحث کیفیت الزامی می‌نماید.

همانگونه که ذکر گردید روابط رگرسیونی پایه و اساس پایش پروفایل‌ها هستند با توجه به این که از لحاظ ریاضی این رابطه‌ها بسیار متنوع هستند. روابط رگرسیونی متنوعی نیز برای آنها تعریف شده است از جمله روابط خطی و غیرخطی، چندگانه، چند متغیره، چند جمله‌ای و... محدودیتهای رگرسیون و همچنین محدودیت‌های ساختارهای مدل آماری برای طراحی و پیاده‌سازی نمودارهای کنترلی، پژوهشگران را ترغیب به استفاده از روشهای دیگر مثل تحلیل مولفه اصلی^۳، برآوردکننده‌های استوار^۴ و یا روشهای مربوط به یادگیری

³ Principal component analysis (PCA)

⁴ Robust estimator

¹ Statistical process control

² Linear mixed models



۳	کنترل سیگنال های تناژ -جین و شی ۱۹۹۹- پروفایل موجی	Press machine
۴	رابطه فشار اعمالی و وزن ماده خام- ۲۰۱۴ GLM - گاما	Injection process
۵	رابطه بین سرعت ابزار و طول عمر ابزار و هزینه-فرایند سلیمانی ۲۰۱۳- چند متغیره خطی	Machining process
۶	رابطه بین قطر سیب و زمان رشد سلیمانی نورالسنا ۲۰۰۹- خط ساده	Agriculture field
۷	رابطه بین عرض خط و موقعیت اندازه گیری سیستم تصویربرداری نوری - گوپتا ۲۰۰۶- خطی ساده	Optical imaging system
۸	رابطه بین دانه بندی دوغاب وزمان مقدم ۲۰۱۵- خطی فازی	Ceramic & Tile Industry
۷	رابطه بین مقدار PH و دما و زمان در مخلوط تولید ماست -زهره حسینی فرد ۲۰۱۲- خطی	Food industry
۸	رابطه یکنواختی محتوی قرص و اثربخشی و کیفیت دارو عبدالجبار داود ۲۰۲۰- خطی ساده	Pharmaceutical Industry
۹	کنترل رابطه گشتاور دور موتور - امیری ۲۰۱۰- خطی چندجمله ای	Automotive industrial

پایش پروفایل در فرایندهای تولید موتور خودرو

فرایندهای اصلی تولید موتور معمولاً به دو دسته ماشینکاری قطعات اصلی سیلندر و سرسیلندر و مونتاژ مجموعه قابل تفکیک هستند سیلندر و سرسیلندر بعنوان قطعات اصلی موتور در فرایندهای ماشینکاری و در ایستگاههای مختلف کاری تولید میشوند. ابعاد مطابق نقشه این قطعات پارامتر اصلی کیفیت این قطعات است. بنابراین مطابق نقشه ها این قطعات ماشینکاری و آماده مونتاژ می گردند. تحت کنترل بودن فرایندهای ماشینکاری توسط نمودارهای کنترلی به کمک تجهیزات اندازه گیری توانمند میتواند میسر باشد. یکی از نقاط با اهمیت در ماشینکاری سرسیلندر فرایند مربوط به مونتاژ سیت (پرس سیت) میباشد. پایش پروفایل نیروی اعمالی و زمان می تواند تحت کنترل بودن این فرایند را برای ما محرز نماید.

ماشین^۱ نموده است. پروفایل های خطی پرکاربردترین نوع از انواع پروفایل هاست. خلاصه ای از انواع پروفایل های خطی و روشهای مورد استفاده در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱: پروفایل خطی و روشهای مورد استفاده

خطی چند گانه چند متغیره	خطی چند متغیره	خطی چند جمله ای	خطی چند گانه	خطی ساده
رویکرد T ² مبتنی بر تخمین زننده تفاضل متوالی	مبتنی بر آماره T ²	روش مبتنی بر نقطه تغییر	کنگ و آلباین نمودار T ²	آماره T ² مستک
رویکرد آزمون نسبت درست نمایی	PCA	روش F	رویکرد مبتنی بر آزمون F	مولفه اصلی مستک
	برآورد کننده های استوار	روش T ²	روش مبتنی بر نقطه تغییر	T ² استور و بریل

هرچند مطالعات گسترده ای نیز بر روی پروفایلهای غیرخطی، خطی، تعمیم یافته، اسپلاین^۲، موجی و... نیز صورت گرفته است که همانگونه که اشاره گردید بیشتر آنها با توجه به پیچیده بودن مدل هایشان از روشهایی نوین مثل روش های مربوط به یادگیری ماشین نیز استفاده می کنند.

در زمینه پیاده سازی و طراحی یک پروفایل، آتاشگر (Atashgar ۲۰۱۲) [۲] یک الگوریتم با ۱۳ مرحله را پیشنهاد داده است.

در زمینه کاربرد رویکرد پایش پروفایل در صنایع و خدمات نیز میتوان گفت که بصورت فراگیری در حال گسترش بوده است، بعضی کاربردهای پایش پروفایل در جدول ۲ ذکر شده است.

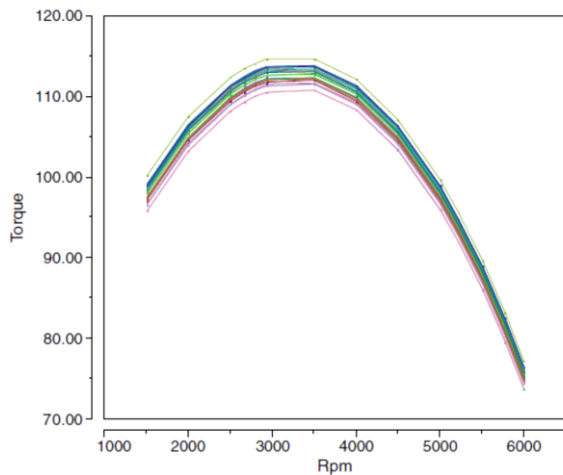
از اولین کاربردهای پایش پروفایل میتوان به فرایند کالیبراسیون تجهیزات اندازه گیری اشاره نمود. کشاورزی، صنایع غذایی، صنایع دارویی، صنایع خودرو و... از جمله صناعی بوده اند که از این رویکرد استفاده نموده اند.

جدول ۲ - برخی از کاربردهای پایش پروفایل در صنایع و خدمات

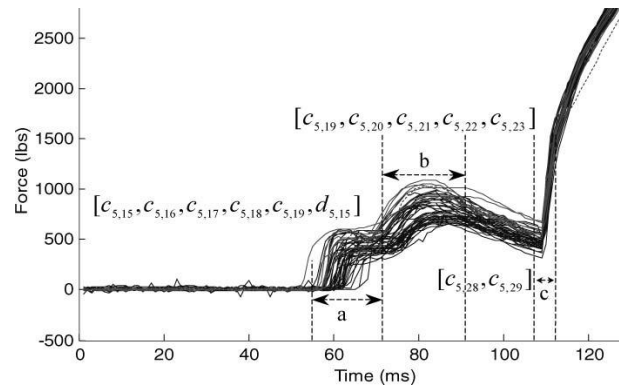
صنعت	پروفایل - پژوهشگر - نوع	
۱	کالیبراسیون ترکمر - ایوبی ۲۰۱۴- خطی چند متغیره	Calibration application
۲	رابطه چگالی عمودی تخته نئوپان و عمق انها-یونگ ۱۹۹۹ غیرخطی	Vertical density profiles

² Spline

¹ Machine learning



شکل ۲- برازش رابطه گشتاور - دور موتور برای نمونه های تست شده



شکل ۱- پروفایل زمان- نیروی اعمالی در فرایند مونتاژ سیت

این پروفایل بوسیله یک مدل غیرخطی و مدل اثر ترکیبی^۱ و موجک^۲ فاز یک و دو طراحی شده است [۳].

اگرچه برای فرایندهای ماشینکاری نیز بصورت عمومی پروفایل هایی تعریف و مورد استفاده قرار گرفته است مثل پروفایل ردیف ۵ جدول ۲.

در فرایندهای مربوط به مونتاژ موتور نیز میتوان کاربرد این رویکرد راملاحظه نمود. مثلاً بعضی از پارامترهایی که امکان اندازه گیری در فرایندهای تست گرم موتور را دارند.

همچنین از رویکرد پایش پروفایل می توان در بعضی از فرایندهای پشتیبان مونتاژ مانند کالیبراسیون ترکمتر استفاده نمود. (با توجه به اهمیت مبحث اتصالات در مونتاژ موتور)

در زمینه کیفیت محصول نهایی نیز میتوان با استفاده از آزمونهای موتوری روابط پروفایلی مناسبی تعریف کرد. از جمله این روابط به رابطه گشتاور - دورموتور می توان اشاره کرد که منشا یک پژوهش [۴] برای یکی از موتورهای تولیدی ایران خودرو بوده است. در این مطالعه این رابطه با یک رابطه خطی دوجمله ای حاصل از نمونه برداری از تعدادی موتور برازش داده شد با توجه به مشاهده وجود خودهمبستگی پروفایلی و محدودیتهای دیگر از یک مدل ترکیبی خطی استفاده و پارامترهای رگرسیون برآورد شد. شکل ۲ نمودار گشتاور - دور موتور را برای موتورهای تست شده نشان می دهد.

مطالعه موردی

رویکرد پایش پروفایل برای کنترل شاخص مصرف سوخت

شاخص های آلودگی و مصرف سوخت مهمترین مشخصه یک موتور احتراق داخلی می باشند [5]

شاخص مصرف ویژه ترمزی BSFC یکی از مشخصه های اصلی موتور است که مقدار آن در فازهای طراحی و توسعه محصول به عنوان اهداف طراحی مدنظر قرار می گیرد در فازهای صحنه گذاری نیز میزان آن ارزیابی و با اهداف طراحی مقایسه و تایید می گردد. با توجه به متغیر بودن مقدار این شاخص در دوره های مختلف عملکرد موتور، کل منحنی میبایست پایش گردد. از طرفی کنترل این شاخص نیازمند انجام تست عملکردی و دارای هزینه قابل توجه بوده و بنابراین انجام آن معمولاً بصورت نمونه ای می باشد. با توجه به مطالب عنوان شده تحت کنترل بودن این شاخص در کل بازه عملکردی موتور با رویکرد پایش پروفایل امکانپذیر می باشد. استفاده از نمودار کنترلی این پروفایل در بلند مدت به همراه تحلیل مهندسی آن میتواند علل بالقوه خرابی موتور را دسته بندی و حتی بعنوان ورودی فرایند توسعه محصول مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به احراز وجود رابطه بین متغیر مستقل (دور موتور) و متغیر پاسخ (BSFC) طراحی و پیاده سازی نظام پایش پروفایل در فاز یک

² wavelats

¹ mixed-effect models



آمیخته (LMM) - بجای استفاده از OLS با ساختار $AR(1)$ مد نظر قرار گرفت.

پس از برازش مدل LMM مشاهده می‌گردد که همبستگی باقیمانده‌ها کاهش می‌یابد که نشان دهنده مناسب بودن LMM با ساختار $AR(1)$ است.

در مرحله بعدی میبایست از آماره T^2 هتلتینگ استفاده کنیم بمنظور کنترل همزمان چند متغیر، استفاده از باقیمانده‌های استاندارد شده مدل LMM و تشخیص نقاط خارج از کنترل در فاز ۱ طی مراحل ذیل:

- محاسبه بردار میانگین و ماتریس کوواریانس محاسبه T^2 برای هر نمونه

$$T_i^2 = (\theta_i - \bar{\theta})^T S_0^{-1} (\theta_i - \bar{\theta})$$

از ۲۱ موتور θ_i میانگین بردارهای

θ_i ماتریس کوواریانس بردارهای

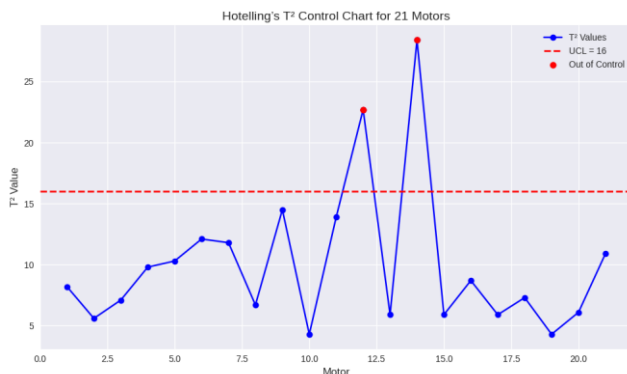
- محاسبه حدکنترلی

$$UCL = \frac{p(n-1)^2}{n(n-p)} F_{\alpha, p, n-p}$$

با فرض و استفاده از تخمین گر مقاوم MVE یا MCD برای محاسبه S_0 (برای جلوگیری از تأثیر داده‌های پرت) و

$$\alpha = 0.005, n = 21, p = 3$$

مقدار حد کنترلی مقدار ۱۶ خواهد داشت.

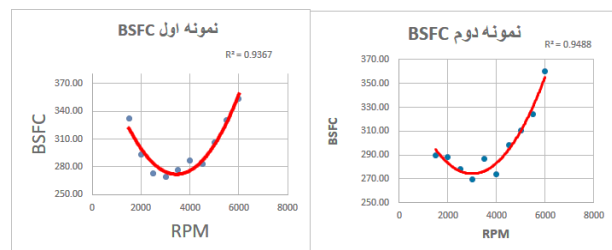


شکل ۳ - نمودار کنترلی برای ۲۱ نمونه

می‌تواند تولید کننده موتور را از تحت کنترل بودن فرایند تولید در حوزه این مشخصه مطمئن سازد.

مطابق الگوریتم معرفی شده پیاده سازی پایش پروفایل [۲] یک طرح نمونه گیری انجام و پس از پالایش نمونه‌ها، نتایج تست عملکردی ۲۱ موتور خط تولید مبنای طراحی قرار گرفت. پیوست ۱ نمونه‌ها طی یک طرح نمونه گیری هفتگی از خط تولید (۲ موتور از ۱۰۰۰ موتور تولیدی) انتخاب و مطابق استاندارد ایزو ۱۵۸۵ که به آزمون عملکرد موتورهای احتراق داخلی مربوط می‌شود ارزیابی شده‌اند.

مقادیر BSFC در ۱۰ نقطه بازه عملکردی موتور (از دور ۱۵۰۰ تا دور ۶۰۰۰) اندازه گیری و نمودارهای مربوطه ترسیم گردید. برای ۲۱ نمونه ذکر شده با توجه به مشابهت نمونه‌ها مدل رگرسیون خطی دو جمله ای برازش داده شد.



شکل ۳ - نمودارهای نمونه‌های اول و دوم و برازش منحنی خطی چندجمله‌ای درجه ۲

شکل ۳ دومنونه از ۲۱ نمونه را نشان می‌دهد همانگونه که ذکر شد روند تغییرات در نمونه‌ها مشابه و فقط در برخی جزئیات متفاوت بوده است.

در مرحله بعدی میبایست خودهمبستگی درون پروفایل و بین پروفایل بررسی گردد وجود خودهمبستگی به عنوان یک عنصر نامطلوب

موجب نقض فرض استقلال در آزمون‌هایی مثل T^2

و همچنین تأثیر منفی در گزارش نمودار کنترل (EWMA،

CUSUM) برای نوسانات طبیعی به عنوان خطا، و گم

شدن تغییرات واقعی در نویز خودهمبسته و برازش ضعیف مدل‌های رگرسیون خواهد بود. بطور کلی از منظر آماری، در صورت وجود

خودهمبستگی لحاظ نکردن آن موجب می‌شود:

- یک موتور معیوب را تحت کنترل تشخیص دهیم (خطای

نوع II)

- یا یک موتور سالم را معیوب تشخیص دهیم (خطای نوع I).

بررسی خودهمبستگی ۲۱ نمونه بوسیله ابزارهای ACF، Durbin-

Watson نشان دهنده خودهمبستگی بخصوص بصورت

خودهمبستگی درون پروفایل می‌باشد. بنابراین استفاده از مدل خطی



در ادامه، از آماره T^2 هاتلینگ برای پایش این پارامترها در فاز ۱ استفاده شد. با محاسبه حد کنترل و مقایسه مقادیر T^2 ، مشخص شد که دو موتور دارای رفتار غیرعادی هستند و الگوی BSFC آن‌ها به طور معناداری از الگوی مرجع انحراف دارند. پس از حذف این دو نمونه غیرعادی، الگوی مرجع پایدار برای ۱۹ موتور باقی‌مانده تعریف شد و حد کنترل نهایی برای فاز ۲ اصلاح گردید. نهایتاً قابلیت رویکرد پایش پروفایل برای اطمینان از تحت کنترل بودن مشخصه BSFC موتورهای تولیدی محرز گردید.

مراجع و منابع

[1] Reza Maleki, M., Amiri, A., Castagliola, P., An overview on recent profile monitoring papers (2008-2018) based on conceptual classification scheme, Computers & Industrial Engineering (2018)

[2] Atashgar k, 2012. Advanced statistical quality control, chapter 6, Research & Educational Institute of defense industry, Tehran, Iran.

[3] Kamran Paynabar & Jionghua (Judy) Jin (2011) Characterization of non-linear profiles variations using mixed-effect models and wavelets,

[4] Amiri, A., Jensen, W. A., and Kazemzadeh, R. B. (2010). A case study on monitoring polynomial profiles in the automotive industry, Quality and Reliability Engineering International,

[۵] اوسطی، مهران و ضیائی موید، مجید و ایرانی، حمید، ۱۳۸۴، رتبه بندی موتورهای احتراق داخلی با استفاده از فنون تصمیم‌گیری با معیارهای چند گانه، چهارمین همایش موتورهای درونسوز، تهران، <https://civilica.com/doc/57459>

همانگونه که نمودار کنترلی اولیه نشان می‌دهد نمونه ۱۲ و ۱۴ خارج از کنترل (مقادیر T^2 بزرگتر از ۱۶) بوده و دلایل آن قابل بررسی بوده است. با حذف نمونه‌های خارج از کنترل و محاسبه مجدد برای حد کنترلی مقدار حدکنترلی معادل ۱۶.۹ خواهیم داشت که می‌توان برای پایش موتورهای جدید از آن استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

رویکرد پایش پروفایل در حوزه تولید موتور خودرو بعنوان یک ابزار کنترلی موثر با هزینه پایین می‌تواند مورد توجه قرارگیرد. همچنین می‌تواند بعنوان یک ابزار دانشی مورد استفاده کارشناسان فنی کیفیت و مهندسی موتور قرار گیرد. در این مطالعه، فرآیند تولید و تست ۲۱ نمونه موتور احتراق داخلی با استفاده از روش پایش پروفایل (Profile Monitoring) مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی، شناسایی وضعیت تحت کنترل بودن شاخص مصرف ویژه سوخت ترمزی (BSFC) موتورهای تولیدی در خط تولید بوده است.

تحلیل داده‌ها نشان داد که خودهمبستگی قوی درون پروفایل (Within-Profile Autocorrelation) در داده‌های BSFC وجود دارد، این موضوع لزوم استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر از رگرسیون معمولی (OLS) را ضروری می‌سازد. برای مدیریت این خودهمبستگی، از مدل خطی آمیخته (Linear Mixed Model - LMM) با ساختار $AR(1)$ در خطاهای باقیمانده استفاده شد. این مدل نه تنها خودهمبستگی درون پروفایل را به درستی لحاظ کرد، بلکه تفاوت‌های بین موتورها را نیز از طریق اثرات تصادفی مدل‌سازی نمود. پس از برازش مدل، پارامترهای رگرسیونی درجه دو (مقطع، شیب و انحنا منحنی BSFC) برای هر موتور استخراج شدند.



پیوست ۱ جدول نتایج مقادیر آزمون ۲۱ موتور

		RPM									
		1501	2001	2501	3002	3502	4002	4502	5002	5503	6003
BSFC	1	332.53	293.15	273.16	269.03	277.03	286.51	282.90	306.77	330.08	353.52
	2	290.06	288.44	278.17	269.63	286.89	273.64	298.06	310.31	324.36	360.54
	3	292.19	296.79	278.49	274.29	293.19	274.47	294.18	301.41	315.74	349.88
	4	294.20	284.17	279.87	279.92	292.11	283.09	302.95	313.71	334.92	348.96
	5	315.10	310.28	296.95	292.11	298.69	289.43	294.82	305.51	321.23	365.04
	6	315.10	310.28	296.95	292.11	298.69	289.43	294.82	305.51	321.23	365.04
	7	292.9213	281.3425	276.0412	275.2635	284.4573	277.5079	296.3197	305.3206	320.8205	338.1437
	8	318.4199	310.1803	303.7437	298.9705	303.2691	297.8263	304.9375	313.7253	337.5906	388.5389
	9	317.72	307.22	295.84	297.33	304.99	300.42	302.52	310.58	331.10	372.76
	10	301.37	290.36	284.21	274.95	301.36	290.17	297.53	309.91	326.34	368.72
	11	294.0209	283.84	279.6211	279.4586	286.2657	280.3912	296.7432	308.3559	325.9148	345.886
	12	298.36	290.46	279.96	274.51	290.49	277.44	301.38	313.36	326.86	366.09
	13	294.0209	283.84	279.6211	279.4586	286.2657	280.3912	296.7432	308.3559	325.9148	345.886
	14	298.3628	290.455	279.9573	274.5051	290.4858	277.4397	301.3825	313.3567	326.8638	366.0852
	15	303.1857	284.2326	282.1084	278.2161	286.0926	281.2587	297.7835	309.1221	324.6593	352.9612
	16	310.4158	288.708	266.0763	260.775	268.8827	277.3276	279.67	314.213	335.7156	351.7425
	17	294.4464	276.9141	271.258	270.2688	276.4209	279.29	280.4923	293.9666	310.1108	342.7069
	18	281.1509	264.4897	258.0147	261.1657	265.563	264.3116	282.763	295.5661	311.6465	345.264
	19	292.9159	280.5329	274.742	273.9652	281.697	277.0639	296.6873	306.1765	324.264	342.0742
	20	296.82	288.34	281.67	280.03	284.80	280.72	301.29	312.58	325.61	349.24
	21	301.67	290.20	280.82	277.80	287.88	281.91	295.20	307.89	325.05	355.96