Archive of SID

«یادداشت تحقیقاتی»

کاربرد روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار در صنعت قطعه‌سازی خودروی ایران

محمد بامنی مقدم

استادیار گروه آمار، دانشگاه علامه طباطبایی

صندوق پستی ۳۴۸۷ / ۱۵۸۱۵

bamenimoghadam @ atu.ac.ir

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۱، پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۳)

چکیده – هدف از این تحقیق کاربردی، به‌کارگیری یکی از اقتصادی‌ترین راهکارهای بهینه‌سازی دومرحله‌ای مقولهٔ کیفیت، در شرکتهای قطعه‌ساز خودرو در ایران است تا توانمندی آن در کاهش هزینهٔ کل محصول در عمل نشان داده شود. به همین منظور، ضمن تشریح روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار و معیارهای ارزیابی مورد نیاز در انجام این کار و ضرورت به کارگیری آن در کشورهای غیرصنعتیی مانند ایران، این روش در عمل در دو شرکت قطعه‌ساز بزرگ یعنی فنرلول ایران و تکلان توس به کار گرفته و نتایج عملی حاصل با وضعیت‌های جاری آنها مقایسه و بررسی شده است. در این راستا، به منظور کاهش هر چه بیشتر هزینه‌های ناشی از اجرای آزمایش، برآورد اثرهای متقابل مرتبهٔ اول از طریق شاخصی که زاوایای خطوط در نمودارهای اثرهای متقابل را در نظر می‌گیرد، انجام شده است.

کلید واژگان: بهینه‌سازی دو مرحله‌ای؛ مهندسی استوار.

۱- مقدمه

در مطالعات مربوط به بهینه‌سازی عملکردی سامانه‌ها (محصول یا فرایند) که در آن دو مسألهٔ اصلی انتقال میانگین و کاهش پراکندگی توزیع مشخصهٔ(های) کیفی در رابطه با مشخصات طراحی آن مطرح است، بسته به شرایط حاکم بر سازمانهای تولیدی، راهکارهای متفاوتی وجود دارد. در این ارتباط، تجربیات گرانقدر سازمانهای قطعه‌ساز کشورهای صنعتی نشان می‌دهد که هزینهٔ کل یک محصول را نمی‌توان از طریق روشهای واکنشی، مانند بازرسی محصول یا حتی ابزارهای کنترل در حین ساخت – که هدف عمدهٔ آنها حفظ دستاوردهای مراحل طراحی است – به طور چشمگیر و اقتصادیی کاهش داد؛ بلکه روشهایی از نوع کنشی باید ابداع و به کار گرفته شود تا بتوان کیفیت بالا را با هزینه‌ای پایین در مراحل طراحی محصول و طراحی فرایند به وجود آورد، یعنی در جاهایی که کیفیت و کاهش هزینه می‌تواند ایجاد شود.

روش بهینه‌سازی عملکردی محصول در مراحل قبل از ساخت، یعنی در مراحل طراحی و طراحی فرایند ساخت، به طور متعارف به دو مرحلهٔ مهم به نام طراحی سامانه و طراحی رواداری محدود می‌شد. در این راستا، اساساً ترجمهٔ نیازهای لازم و تعیین شده به مشخصات طراحی (فنی) که توسط طراح انجام می‌شود، طراحی سامانه نام دارد که حاصل آن ممکن است به صورت نقشه‌ها و نمونه‌ای از محصول باشد. به بیان دیگر، در این مرحله از روش بهینه‌سازی قبل از ساخت، طراح، انواع معماری یا فناوری را برای دستیابی به عملکرد مطلوبی از

www.SID.ir

Archive of SID

محصول (یا فرایند ساخت) بررسی و مناسبترین آنها را انتخاب می‌کند [۱]. در طراحی رواداری، حدود رواداری به طور اختیاری کاهش می‌یابد و بر اساس میزان تاثیر آن بر هزینهٔ واحد ساخت، مواد و قطعات با درجهٔ بالاتر به طور اختیاری به گونه‌ای تعیین می‌شود که کیفیت محصول ارتقا یابد.

از نیمهٔ دهه ۱۹۸۰، مرحلهٔ نوینی از طرف تاگوچی به مراحل دوگانهٔ متعارف طراحی محصول و طراحی فرایند ساخت اضافه شد که از طریق انتشار ترجمهٔ کارهای تاگوچی [۲] توسط مؤسسهٔ فناوری ماساچوست (MIT) در سال ۱۹۸۷، به‌کارگیری عملی و توسعه نظری آن به‌سرعت گسترش یافت. این مرحلهٔ نوین - که با عناوین طراحی پارامتری یا طرح استوار یا مهندسی استوار معروف شده بر آن است که تحت حدود رواداری پهن، یعنی با به‌کارگیری قطعات و مواد با درجه پایین‌تر، تجهیزات ارزان‌تر و شرایط محیط به‌کارگیری با دامنهٔ گسترده‌تر و از طریق تعیین مقادیر عوامل قابل کنترل نافذی که کمترین اثر را بر هزینهٔ ساخت دارند، این کار طوری صورت گیرد که اولاً حساسیت عملکرد محصول به منابع اغتشاش، بیشتر از مرحلهٔ طراحی سامانه کاهش یابد و در نتیجه ضرر کیفی حداقل شود (پراکندگی کاهش یابد)، و ثانیاً میانگین مشخصهٔ کیفی مورد نظر، به مقدار آرمانی آن نزدیکتر شود (اریبی کاهش یابد). بدین روش، تحت شرایط هزینهٔ ساخت پایین، حساسیت(تغییرپذیری) عملکرد محصول به منابع اغتشاش حداقل می‌شود و ضرر کیفی یا هزینه‌های به‌کارگیری کاهش می‌یابد [۳-۶]. این روش به‌خلاف روشهای متعارف هزینه‌بر در طراحی محصول و طراحی فرایند ساخت - یعنی روشهای طراحی سامانه و طراحی رواداری که از طریق کنترل علت یا حذف آن و در نتیجه هزینهٔ بالا موجب بهینه‌سازی می‌شود - از طریق غیرحساس‌سازی سامانه‌ها به اغتشاشات موجود در محیط ساخت یا به‌کارگیری، و بدون تحمیل هیچگونه سرمایه‌گذاری اضافه در عوامل تولید، موجب کاهش یک یا هر دو مؤلفهٔ هزینهٔ کل محصول می‌شود.

یکی از مشکلات اساسی مربوط به بهینه‌سازی در شرکتهای قطعه‌سازی خودرو در ایران، عدم آگاهی این شرکتها از وجود و همچنین اعمال اقتصادی این روش است که می‌تواند فرایندها را تحت شرایط تولیدی حاکم بر سازمان آنها، نسبت به اغتشاشات موجود در محیط ساخت یا حتی محیط به‌کارگیری (درونی ، برونی و واحد به واحد)، غیرحساس نماید. این شرکتها برای بهینه‌سازی محصولات خود در مراحل قبل از ساخت، اغلب به طراحی سامانه، آن هم از طریق خرید فناوری و در مراحل حین ساخت، به روشهای کنترل آماری فرایند (SPC) تکیه دارند. این در حالی است که اتکا به طراحی سامانه، مستلزم سرمایه‌گذاری بسیار زیاد و اتکا به روشهای کنترل آماری فرایند - که آن نیز هزینه‌های واحد ساخت را افزایش می‌دهد - با تغییرپذیری واحد به واحد به صورت بسیار محدود مبارزه می‌کند.

در کشورهایی مانند ایران، مراحل طراحی سامانه (ترجمهٔ نیازهای بازار به مشخصات فنی) و طراحی رواداری (انتخاب اختیاری حدود رواداری باریکتر) در طراحی فرایند ساخت، - یعنی یکی از جاهایی که می‌توان کیفیت و هزینه را به طور چشمگیر و به صورت اقتصادی بهینه کرد - اصولاً نهادینه نیست و به علت عدم بسترسازی مناسب، این نوع فعالیتها دورنمای روشن اقتصادی برای رقابت سالم در سطح جهان ندارد یا اینکه آن شرکتهای قطعه‌ساز خودرو می‌خواهند بدون هیچگونه سرمایه‌گذاری اضافه در عوامل تولید، بهینه‌سازی کنند، یکی از بهترین روشهای بالا بردن کیفیت یا کاهش هزینهٔ واحد ساخت محصول در شرایط موجود حاکم بر سازمانهایشان، به‌کارگیری روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار است.

در این مقاله، ضمن مروری مختصر روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار و معیارهای ارزیابی مورد

www.SID.ir

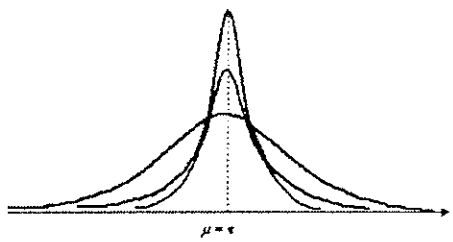
Archive of SID

نیاز برای انجام این کار، کاربرد آن در کاهش ضایعات فرایندهای فنرسوپاپ و پانچزنی سیلندر ترمز دو مدارهٔ نوعی خودرو در دو شرکت قطعه‌ساز بزرگ، یعنی فنرلول ایران و تکلان توس، به محک تجربه گذاشته شده تا توانمندی این روش در کاهش یک یا هر دو مؤلفهٔ هزینهٔ کل (هزینهٔ واحد ساخت و هزینهٔ به‌کارگیری) در صنعت قطعه‌سازی خودروی ایران آشکار شود.

۲- روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار

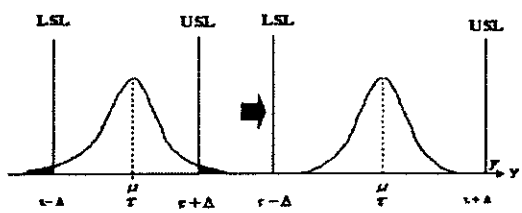
در دنیای امروز، همزمان با بهبود و گسترش مزایای فناوری و مبادلهٔ اطلاعات و وابستگی روزافزون جامعهٔ بشری به آن، رابطهٔ کیفیت محصولات با رفاه بشری روز به روز گسترش یافته و به قدری ضروری شده است که توسعهٔ مفهوم کیفیت برای ارزیابی، ایجاد، بهبود و حفظ آن، اجتناب ناپذیر است. در این راستا، صرفنظر از اینکه تعاریف متفاوتی با اهداف مذکور ارائه شده، همهٔ آنها به وجود دو جنبهٔ مهم در کیفیت اتفاق نظر دارند. یکی واقعیت و عینیت شیء است مانند خواص عینی فیزیکی محصول (کیفیت عینی)، و دیگری ادارک و احساس فرد در رابطه با عینیت آن شیء (کیفیت ذهنی) [۷]. این کیفیت ذهنی که مربوط به دسته‌بندی انسانها و در نتیجه تقسیم‌بندی بازار است و اقلامی مانند خصوصیات، اندازه‌ها، رنگها و طرحها را دربردارد، به علت متغیر بودن آن از یک فرد به فرد دیگر، نمی‌تواند به‌سادگی اندازه‌گیری شود. به عبارت دیگر، در حالی که کیفیت ذهنی، اندازهٔ بازار محصول را تعریف می‌کند، کیفیت عینی یا مهندسی، موجب افزایش سهم محصول در آن بازار می‌شود. بنابراین، مسئوولیت مهندس، ابداع و توسعهٔ نظامی است که بتواند وظایف مورد انتظار ارائه شده توسط کیفیت ذهنی آن بخش از بازار را برآورده سازد.

از دیدگاه کیفیت عینی یا کیفیت عملکردی، بهبود کیفیت محصول، چیزی جز کاهش پراکندگی (σ^2) توزیع مشخصهٔ کیفی (متغیر پاسخ) محصول و انتقال میانگین (μ) آن به سمت مقدار هدف (τ) نیست. از آنجا که انتقال میانگین توزیع در سامانه‌ها غالباً بسیار ساده‌تر از کاهش پراکندگی توزیع مشخصهٔ کیفی است، بهبود کیفیت در محصولات یا فرایندها، معمولاً بر کاهش پراکندگی متمرکز شده است. بنابراین با فرض نرمال بودن توزیع مشخصهٔ کیفی موردنظر و برابر بودن μ با τ، کیفیت عینی به صورت شکل ۱ ارائه می‌شود که در آن کیفیت بهتر مترادف با توزیعی است که پراکندگی کمتری دارد.

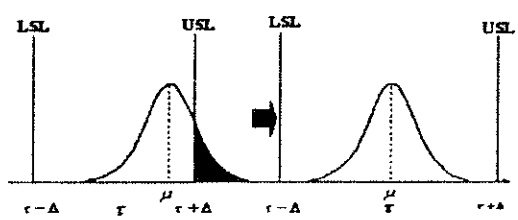


شکل ۱ کیفیت عملکردی

در نتیجه، بر طبق تعریف کیفیت عملکردی، هر روش بهینه‌سازی در مهندسی باید به طور نظام‌مند بتواند با مسائل کاهش پراکندگی و انتقال میانگین توزیع مشخصهٔ کیفی سامانه، به سمت مقدار هدف روبه‌رو شود. این مفهوم بهینه‌سازی دو مرحله‌ای ممکن است به صورت شکلهای ۲ و ۳ ارائه شود.



شکل ۲ کاهش پراکندگی در کیفیت عملکردی



شکل ۳ انتقال میانگین در کیفیت عملکردی

www.SID.ir

Archive of SID

بررسیهای بیشتر شرکتهای موفق و مطرح در کشورهای صنعتی نشان می‌دهد که این سازمانها، بهینه‌سازی را برای فناوری موردنظر، از طریق به‌کارگیری روش دو مرحله‌ای مهندسی استوار انجام می‌دهند که نتیجهٔ آن، ساخت محصولاتی با کیفیت بالا و هزینهٔ پایین است. اما شرکت‌هایی که از توانمندی این روشها بی‌اطلاع هستند، برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌ها مجبورند به طور چشمیگری به طراحی رواداری و طراحی سامانه متکی باشند. اتکا به طراحی رواداری، محصولات را برای ساخت، گرانتر می‌سازد و اتکا به طراحی سامانه، مستلزم به دست آوردن نوآوری و ابتکارها در فناوری است که برنامه‌ریزی برای آن بسیار مشکل بوده و منجر به سرمایه‌گذاری زیاد و زمان طولانی توسعه می‌شود.

در کشورهایی مانند ایران که تغییرپذیری در مواد و قطعات بسیار زیاد و مشکلات نقدینگی چشمگیر و طراحی واقعی سامانه‌ها در قریب به اتفاق صنایع نهادینه نیست، روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار بویژه در مرحلهٔ طراحی فرایند ساخت - که دستاورد حداقل آن تنظیم بهینهٔ فرایند است - باید یکی از مهمترین روشهای بهینه‌سازی در سطوح عملیاتی باشد. در واقع، روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی کیفیت در این کشورها باید توفیق بیشتری را نسبت به کشورهای صنعتی به دست آورد. یکی از دلایل مهمی که بیشتر تولیدکنندگان در کشورهای غیرصنعتی علی‌رغم داشتن دانش فنی بالا و به‌کارگیری فناوری کشورهای صنعتی، محصولاتی با کیفیت پایین و هزینهٔ بالا و در نتیجه غیررقابتی برای محصول تعریف شدهٔ مشابه تولید می‌کنند، این است که مهندسان آنها این روشها را حتی برای بهینه‌سازی تعیین مقادیر پارامترهای فرایند تولید به کار نمی‌برند که از طریق این بهینه‌سازی می‌توان بدون تحمیل هیچگونه هزینه‌ای با اغتشاشات موجود در ساخت - که ممکن است متفاوت از اغتشاشاتی باشد که سازندهٔ فناوری با آن روبرو بوده - مبارزه کند. آنها چشم بسته مشخصات پارامترهای ارائه شده در کاتالوگ‌ها یا گفته‌های همکاران قبلی خود را قبول می‌کنند؛ در حالی که ممکن است عوامل اغتشاش محیط ساخت محصول، متفاوت با آنهایی باشد که در تعیین مقادیر بهینهٔ پارامترها در نظر گرفته شده است.

روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار برای کشف طرح بهینه، از طرح آزمایشها استفاده می‌کند. هدف از این بخش مرور مختصر روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار بود و خوانندهٔ علاقه‌مند می‌تواند برای بررسی کامل در این زمینه به مراجع ۱ تا ۷ رجوع نماید. به منظور درک راحتتری از مقولهٔ روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار، می‌توان فرایند پیاده‌سازی آن را به صورت چرخهٔ معروف دمینگ برای بهبود مستمر ارائه داد:

الف ـ برنامه‌ریزی

مرحلهٔ ۱: تعریف برد پروژه.

مرحلهٔ ۲: تعریف حدود زیرنظامها.

مرحلهٔ ۳: تعریف ورودیها، خروجی و تابع هدف.

مرحلهٔ ٤: تعریف راهبرد علامتی و اغتشاشی.

مرحلهٔ ٥: تعریف عوامل قابل کنترل و سطوح آنها.

مرحلهٔ ٦: طرح‌ریزی آزمایش.

ب ـ اجرا:

مرحلهٔ ۷: اجرای آزمایش به صورت فیزیکی یا شبیه‌سازی و جمع‌آوری داده‌ها.

مرحلهٔ ۸: اجرای تحلیل داده‌ها برای تحلیل پراکندگی و تحلیل میانگین.

مرحلهٔ ۹: اجرای بهینه‌سازی دو مرحله‌ای.

مرحلهٔ ۱۰: انجام پیش‌بینیهای لازم.

پ ـ بررسی

مرحلهٔ ۱۱: اجرای آزمایشهای صحه‌گذاری (تأییدی) و ارزیابی تجدیدپذیری آن.

www.SID.ir

Archive of SID

ت ـ عمل

مرحلهٔ ۱۲: مستندسازی و به‌کارگیری نتایج.

هدف تحقیقی در این روش، بهینه‌سازی معیارهای ارزیابی بر روی فضای طراحی آزمایش است که در آن هرگونه ارزیابی بتواند تغییرپذیری فضای اغتشاشات را نیز مدنظر قرار دهد. در اینجا فضای طراحی آزمایش از طریق یکی از ارائه‌های متعامد استاندارد هجده‌گانه‌ای انجام می‌شود که توسط تاگوچی در مقولهٔ طراحی آزمایشها ارائه شده است. اما معیارهای ارزیابی مورد استفاده برای ارزیابی نتایج آزمونهای آزمایش - که با هدف بهینه‌سازی تغییرپذیری و انتقال میانگین انجام می‌شود - می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد که برخی از آنها در روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار به قرار زیر است.

الف ـ معیار ارزیابی نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار

$$S/N(\vec{x}j) \equiv -10 \cdot \mathrm{Log}\left[\sum(pp(\vec{x}j,\vec{p}_i)-\tau)\times\frac{1}{m}\right]$$

که در آن $\vec{x}j$، بردار پارامترهای طراحی (ترکیب سطوح عوامل قابل کنترل) مربوط به jامین آزمون آزمایش طراحی شده، pp، پارامتر عملکرد مورد بررسی، m، تعداد تکرار و یا پارامترهای اغتشاش $\vec{p}_i$ و τ مقدار اسمی یا هدف است.

نقاط در فضای اغتشاش $\vec{p}_i$ که آرایهٔ عوامل اغتشاش یا خارجی نامیده می‌شود، از طریق نوعی روش عاملی به نام ارائه‌های متعامد انتخاب می‌شود. در این راستا، آزمایشهای عاملی کسری برای عملی شدن اجرا، برای کاهش محاسبات و هزینه‌های مربوط به انجام آزمایش به کار برده می‌شود. تاگوچی به‌کارگیری معیار ارزیابی S/N ارائه شده در بالا را بر پایهٔ دو جملهٔ اول بسط تیلور تابع ضرر مربوط به مشخصهٔ کیفی مورد بررسی، توجیه می‌کند.

ب ـ نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار بر پایهٔ میانگین مجذور انحرافات از مقدار هدف (MSD)

$$S/N = -10 \cdot \mathrm{Log}\,(MSD)$$

که در آن $MSD = \sum(y-\tau)^2/m$. میانگین مجذور انحرافات از مقدار هدف، اثرهای میانگین و پراکندگی را با یکدیگر ترکیب کرده و معمولاً شرایط بهینهٔ میانه‌ای را تقریباً بدون ابهام شناسایی می‌کند.

پ ـ نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار بر پایهٔ فقط واریانس

$$S/N = -10 \cdot \mathrm{Log}(S^2)$$

که در آن $S^2 = (SST-SSM)/(m-1)$، $=\sum y^2/m$ SSM و $SST = \sum y^2$. از آنجا که مقدار هدف در این رابطه حضور ندارد، برای انتقال میانگین توزیع به سمت مقدار هدف باید معیارهای ارزیابی دیگری به کار برده شود.

ت ـ نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار بر پایهٔ میانگین و واریانس

$$S/N = +10 \cdot \mathrm{Log}\,[(SSM - S^2)/(m.S^2)]$$

از آنجا که این رابطه ریاضی - که ممکن است به عنوان رابطه‌ای کلاسیک شناخته شود - مقدار هدف را به کار برد، انتقال میانگین توزیع به سمت هدف باید از طریق پارامتری قابل تنظیم در فرایند - که طراح به همین منظور در سامانه تعبیه کرده - انجام شود.

ث ـ نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار بر پایهٔ میانگین و واریانس

$$S/N = +10 \cdot \mathrm{Log}\,(\bar{y}/S)^2$$

که در آن $\bar{y}$، میانگین و S، انحراف معیار مشخصهٔ کیفی در هر آزمون از آزمایش طرح‌ریزی شده است. این S/N که شکل ساده‌تر S/N ارائه شده در بند ت است، نتایجی را مشابه رابطهٔ کلاسیک ارائه می‌کند و معمولاً زمانی به کار می‌رود که کاهش تغییرپذیری حول میانگین به اندازهٔ

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش کل تغییرپذیری اهمیت نداشته باشد.

ج ـ نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار برای مشخصه های کیفی از نوع «هر چه کمتر بهتر»

$$S/N = -10\ Log\ (\sum y^2 / m) = -10\ Log(MSD)$$

این معیار ارزیابی که مانند بند ب، اثر میانگین و پراکندگی را با یکدیگر ترکیب می‌کند، برای مشخصه‌های کیفی دارای مقادیر مثبت و مقدار هدف برابر صفر، به کار می‌رود.

ج ـ نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار برای مشخصه‌های کیفی از نوع «هر چه بیشتر بهتر»

$$S/N = -10\ Log\ (\frac{1}{m}\sum\frac{1}{y^2}) = -10\ Log(MSD)$$

این معیار ارزیابی که مانند بند ج، اثر میانگین و پراکندگی را ترکیب می‌کند برای مشخصه‌های کیفی مقادیر مثبت و مقدار هدف برابر بی‌نهایت (∞) به کار می‌رود.

ح ـ انحراف معیار

برای کاهش تغییرپذیری توزیع مشخصهٔ کیفی، از روش استاندارد انحراف معیار نیز می‌توان استفاده کرد که انحراف معیارهای (S_i) مشاهدات حاصل از هر آزمون آزمایش را به عنوان متغیر پاسخ مدنظر قرار می‌دهد؛ و سپس روش معمول تحلیل واریانس برای تحلیل داده‌ها به کار رود.

خ ـ میانگین

برای انتقال میانگین توزیع مشخصهٔ کیفی، از روش استاندارد میانگین استفاده می‌شود که در آن، میانگین ($\bar{y}$) مشاهدات حاصل از هر آزمون آزمایش، به عنوان متغیر پاسخ مدنظر قرار می‌گیرد و سپس روش معمول تحلیل واریانس برای تحلیل داده‌ها به کار می‌رود.

۳- کاربرد روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار در شرکتهای فنرلول ایران و تکلان توس

شرکتهای فنرلول ایران و تکلان توس از بزرگترین قطعه‌سازان خودرو در ایران هستند که به ترتیب انواع فنر و مجموعه‌های ترمز را برای انواع خودرو در کارخانه‌های خود در شهرهای دامغان و مشهد تولید می‌کنند. مدیریت این شرکتها برای بالا بردن کیفیت و کاهش هزینهٔ واحد ساخت تولیدات خود، از هیچ کوششی دریغ ننموده و همواره از طریق آموزش کارکنان خود در داخل و خارج از کشور و با به‌کارگیری آخرین دستاوردها سعی کرده‌اند بهینه‌سازی را در حد بسیار خوبی در شرکتهای خود اجرا نمایند. کاربرد روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار در شرکتهای فنرلول ایران و تکلان توس با هدف کاهش یک یا هر دو مولفهٔ هزینهٔ کل، یعنی کاهش هزینه‌های واحد ساخت یا به‌کارگیری هر محصول از تولیدات این شرکتها، با شرط اینکه هیچگونه سرمایه‌گذاری اضافه‌ای در عوامل تولید ایجاد نشود، یعنی بدون هیچگونه تغییری در مواد اولیه، فناوری، نیروی کار، و مانند آن انجام شد. برای این منظور، مقرر شد که مشکل‌زاترین محصول در این شرکتها تعیین شده و کار بر روی مهمترین مشخصه‌های کیفیی که آن مشکل را ایجاد می‌نماید، آغاز شود.

بررسیهای اولیهٔ محصولات در شرکتهای فنرلول ایران و تکلان توس بیانگر این موضوع بود که فنرسوپاپ و سیلندر ترمز دو مدارهٔ نوعی خودرو باید در اولویت مطالعاتی قرار گیرند. در این راستا، یکی از عمده‌ترین مشخصه‌های کیفی در فنرسوپاپ موردنظر نوعی خودرو که موجب ایجاد ۹۶/۷۷ درصد اقلام نامنطبق، یعنی تعداد ۹۶۷,۷۰۰ فنرسوپاپ از کل تعداد تولیدی سالانه یعنی ۱,۰۰۰,۰۰۰ عدد، در این نوع محصول شرکت می‌شد، مشخصهٔ کیفی نیرو در طول F_1 با مشخصات فنی ۱۶/۸۰ ± ۲۸۰/۲ بود. مشخصهٔ کیفی مشکل‌زای عمده در سیلندر ترمز دو مدارهٔ نوعی خودرو که در شرکت تکلان توس تولید می‌شد، ترکهای غیرمجازی بود که در مرحلهٔ پانچ‌زنی برای ایجاد مدارهای جبران‌کنندهٔ روغن سیلندر ترمز به وجود می‌آمد و موجب حداقل ۳/۵ درصد اقلام

www.SID.ir

Archive of SID

نامنطبق، یعنی تعداد ۲,۴۵۰ سیلندر از کل تعداد تولیدی سالانهٔ ۷۰,۰۰۰، می‌شد. مرحله پانچ‌زنی که از مراحل پایانی تولید سیلندرهای ترمز است، دو سوراخ جبران‌کنندهٔ روغن ترمز را در سیلندر ترمز دو مداره، طوری از داخل سیلندر ایجاد می‌کند و پخی حول آنها را به وجود می‌آورد که واشرهای حلقوی حول پیستون ترمز در زمان عملکرد به آسانی صدمه نبیند و عمر مفید طولانیتری برای آنها حاصل شود. برای این منظور، نخست در قسمتی از ضخامت سیلندر که باید سوراخهای جبران‌کننده ایجاد شود از طریق فرزکاری، سوراخی در دیوارهٔ سیلندر ایجاد می‌کنند تا ضخامت پانچ‌زنی به مقدار دلخواه نازک شود تا مرحلهٔ پانچ‌زنی بدون هیچگونه مشکلی توسط دستگاه مربوط انجام شود.

برای کاهش درصد اقلام نامنطبق این دو محصول از دو شرکت بزرگ قطعه‌ساز - بدون هیچگونه سرمایه‌گذاری اضافه در عوامل تولید - مقرر شد که روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار به کار رود. برای این منظور نخست در طی نشستهای متعددی با متخصصان و مرور و شناسایی عوامل مؤثر، فرایندها مورد بررسی قرار گرفته و عوامل قابل کنترل (پارامترهای طراحی) و اغتشاش و سطوح مربوط به آنها مشخص شد (جداول ۱ و ۲).

در این راستا، ارائه‌های متعامد مناسبی برای طرحریزی آزمایشهای فرایندهای تولید فنر سوپاپ و پانچ‌زنی سیلندر ترمز - که در آنها حداقل به ترتیب به ۱۵ = ۱ + (۱_۳) ۷ و ۱۳ = ۱ + (۱_۳)۵ + (۱_۲)۲ درجهٔ آزادی نیاز است - آرایهٔ متعامد استاندارد L_{18} می‌تواند باشد که ۱۷ درجهٔ آزادی دارد. این ارائه‌ها که در شکل ٤ آورده شده برای برآورد اثرهای عاملی موردنظر، کمترین هزینه را برای اجرای آزمونهای آزمایش در هر یک از فرایندها ایجاد می‌کند.

جدول ۱ عوامل قابل کنترل و سطوح آنها در فرایند تولید فنر سوپاپ

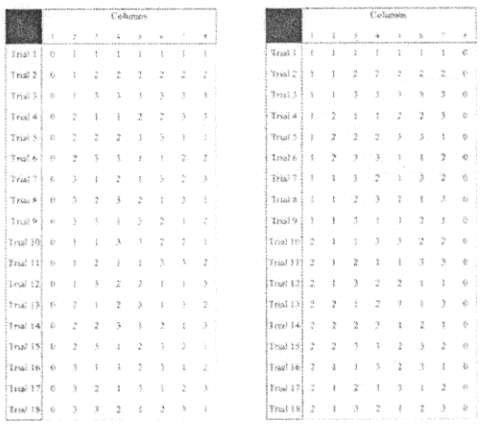
ردیف	عامل	سطح عامل			واحد اندازه‌گیری
		I	II	III	
۱	تعداد حلقه در فنرپیچی	٤/۹	۵/۰	۵/۱	حلقه
۲	بادامک گام‌انداز در فنرپیچی	L=۲۸۵ و R=۱۳۵	L=۲۸۰ و ۱۳۰= R	L=۲۷۵ و R=۱۲۵	درجه
۳	زاویهٔ گام‌انداز در فنرپیچی	٤۰	٤۸/۵	٦۰	درجه
٤	سرعت دستگاه فنرپیچی	۳۰	٤۰	۵۰	تعداد در دقیقه
۵	سرعت سنگ‌زنی	۲۰	۲۵	۳۰	دور در ثانیه
٦	فشار سنگ‌زنی	٦۰	۷۰	۸۰	بار
۷	زمان ساب	٦۰	۱۲۰	۵۰	ثانیه

جدول ۲ عوامل قابل کنترل و عوامل اغتشاش و سطوح آنها در فرایند پانچ‌زنی سیلندر ترمز دو مداره

	ردیف	عامل	سطح عامل			واحد اندازه‌گیری
			I	II	III	
عوامل قابل کنترل	۱	روش پانچ‌زنی	یک پانچی	دو پانچی	—	—
	۲	نوع مواد سیلندر	غیرگوگردی	گوگردی	—	—
	۳	اندازه ی پخ پانچ	متوسط	حداقل	حداکثر	میلی متر
	٤	سرعت رفت پانچ	حداکثر	متوسط	حداقل	تعداد رزوه
	۵	سرعت برگشت پانچ	متوسط	حداقل	حداکثر	تعداد رزوه
	٦	نیروی پانچ زنی	٦	۷	۵	بار
	۷	ضخامت دیواره	۰/۸۵	۰/۹۰	۰/۷۵	میلی متر
عامل اغتشاش	۸	سختی سیلندر	۱۸۰_۲۰۰	۲۰۰_۲۲۰	—	راکول

www.SID.ir

Archive of SID



ماتریس فنزایند پانچ‌زنی ماتریس فرایند فنرسوپاپ

شکل ٤ ارائه‌های متعامد استاندارد L_{18} به کار رفته در آزمایشهای فرایندهای فنرسوپاپ و پانچ‌زنی

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، ستونهایی از آرایه‌های متعامد که هیچ عاملی به آنها تخصیص داده نشده، با سطوح صفر نشان داده شده است.

به منظور کاهش هر چه بیشتر هزینه‌ها، - بویژه در اجرای آزمایش - از طریق کاهش تعداد آزمونهای آن، سعی بر آن بود که برآورد اثرهای اصلی را از طریق تخصیص هر چه بیشتر عوامل به ارائه‌های متعامد تاگوچی، و برآورد اثرهای متقابل را از طریق شاخصی (شاخص شدت اثرهای متقابل) - که بتواند زاویهٔ خطوط برازش داده شده به سطوح عوامل را در نمودارهای اثرهای متقابل مرتبهٔ اول اندازه‌گیری نماید - محاسبه نماییم. برای این منظور، شدت اثرهای متقابل بر پایهٔ صفر درصد برای زاویهٔ خطوط موازی و ۱۰۰ درصد برای زاویهٔ ۹۰ درجه محاسبه شد تا ضمن استفاده از ارائه های متعامد کوچکتر، تصمیم نهایی با توجه به اثرهای متقابل، صحیح تر اتخاذ شود.

براساس آزمونهای ۱۸گانه‌ای که ترکیبهای سطوح عوامل مورد بررسی در هر یک از دو فرایند مورد مطالعه است و سطرهای ماتریس طرح آزمایش را تشکیل می‌دهد تعداد ۱۸۰۰= ۱۰۰ × ۱۸ فنر سوپاپ و ۳٦ = ۲ × ۱۸ سیلندر ترمز تولید شد تا به ترتیب، مشخصه‌های کیفی نیرو درطول F_1 و تعداد ترکها برای هر یک از نمونه‌های مربوط تعیین شود.

از آنجا که در فرایند تولید فنر سوپاپ هیچگونه عامل اغتشاشی از نوعی که به عنوان اغتشاشات معمول (درونی، برونی، و واحد به واحد) شناخته می‌شود، مدنظر نبوده تا بخواهیم فنر سوپاپ تولیدی را نسبت به آن اغتشاش خاص نیز غیرحساس نماییم، ماتریس عوامل اغتشاش در ماتریس آزمایش وجود نخواهد داشت. اما از آنجا که در فرایند پانچ‌زنی، علاوه بر اغتشاشات معمول، می‌خواهیم فرایند را نسبت به سختی سیلندرهای خام ورودی شرکت غیرحساس نماییم که غیرقابل کنترل و بین ۱۸۰ تا ۲۲۰ راکول در نوسان بوده و اشکالات متعددی ار در زیرفرایندهای تولید سیلندرهای ترمز ایجاد می‌کند، باید یک ماتریس عوامل اغتشاش نیز داشته باشیم. از آنجا که این اغتشاش - بویژه در فرایند پانچ‌زنی - فقط عامل سختی سیلندرهای خام است، می‌توان ماتریس عوامل اغتشاش را به صورت آرایهٔ چند رسته‌ای مطرح کرد که در این مورد، سختی سیلندر به دو رستهٔ ۲۰۰ـ۱۸۰ و ۲۲۰ ـ۲۰۰ راکولی تقسیم شده است. به همین منظور و با هدف کاهش هزینه‌های اجرای پروژه، در هر آزمون، آزمایش طرح ریزی شده، تعداد یک سیلندر در هر یک از دو رسته سختی بررسی شد.

٤- تحلیل داده‌ها

در روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای مهندسی استوار سعی بر آن است که نوعی تعدیل از طریق اثربخشی عوامل نافذ در مشخصه‌های کیفی مورد بررسی به وجود آید تا هر دو مشکل مربوط به کیفیت توسط انتخاب سطوح بهینهٔ عوامل نافذ، حل شود. اگر مسألهٔ اول کیفیت را کاهش تغییرپذیری توزیع مشخصه‌های کیفی مورد بررسی فرض کنیم، می‌توان از طریق نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار که بر پایهٔ فقط واریانس است، داده‌های حاصل از اجرای ماتریسهای آزمایش را تبدیل کرده و

www.SID.ir

Archive of SID

آنگاه روش تحلیل واریانس را برای تعیین عوامل نافذ و سطوح بهینه آنها در پراکندگی توزیعهای مشخصه‌های کیفی مورد بررسی، به کار برد. سپس مسألهٔ دوم، یعنی انتقال میانگین توزیعهای مشخصه‌های کیفی، را از طریق به‌کارگیری روش تحلیل واریانس میانگینهای داده‌های آزمونهای آزمایشها و تعیین عوامل نافذ بر میانگین و سطوح بهینه آنها، بررسی کرد. برای این منظور، نخست به بهینه‌سازی در فرایند تولید فنر سوپاپ در رابطه با مشخصهٔ کیفی نیرو در طول F_1 می‌پردازیم که دارای مشخصات فنی $۲۸۰/۲ \pm ۱۶/۸۰$ نیوتن است. به این منظور با به‌کارگیری بند پ و خ معیارهای ارزیابی، جداول تحلیل واریانس داده‌های مربوط برای کاهش پراکندگی و انتقال میانگین توزیع مشخصهٔ کیفی نیرو در طول F_1 در فرایند تولید فنر سوپاپ به صورت جداول ۳ و ٤ محاسبه می‌شود که در آنها علامت ستاره معنادار بودن اثر عوامل را در سطح $\alpha = ۰/۰۵$ نشان می‌دهد. در این راستا لازم است ذکر شود که شرایط احراز به کارگیری روش تحلیل واریانس برای هر دو نوع دادهٔ تولیدی حاصل از آزمایش، از طریق آزمونهای کلموگرف

جدول ۳ جدول تحلیل واریانس داده‌های S/N برای کاهش واریانس توزیع نیرو در طول F_1

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۲	تعداد حلقه در فنر پیچی	۲	۱٦/۰٥۳	۸/۰۲٦	۱/٥٤٥	٤/٤۳
۳	بادامک گام‌انداز در فنرپیچی	۲	۱٤/۳٦۷	۷/۱۸۳	۱/۳۸۳	۳/۱۱
٤	زاویهٔ گام‌انداز در فنرپیچی	۲	٥/۷۸۳	۲/۸۹۱	۰/٥٥٦	۰/۰۰
٥	سرعت دستگاه فنرپیچی	۲	۱٤/۲	۷/۱۱	۱/۳٦۹	۲/۹۹
٦	سرعت سنگ‌زنی	۲	٤٥/٤٦٦	۲۲/۷۳۳	٤/۳۷۷	۲۷/٤٤
۷	فشار سنگ‌زنی	۲	۱۲/٥۰۳	٦/۲٥۱	۱/۲۰۳	۱/٦٦
۸	زمان ساب	۲	۳/۸٤۹	۱/۹۲٤	۰/۳۷	۰/۰۰
خطا		۳	۱٥/٥۷۹	۵/۱۹۳	—	٦۰/۳٦
کل		۱۷	۱۲۷/۸۲۳	—	—	۱۰۰/۰۰

جدول ٤ جدول تحلیل واریانس داده‌های اصلی برای انتقال میانگین توزیع نیرو در طول F_1

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۲	تعداد حلقه در فنر پیچی	۲	۳۲۳۰/۸۸۸	۱٦۱٥/٤٤٤	×	۰/۸٦
۳	بادامک گام‌انداز در فنرپیچی	۲	۲۸۳۷۲۹/٦۹۱	۱٤۱۸۷٤/۸٤٥	×	۷٥/۳۲
٤	زاویهٔ گام‌انداز در فنرپیچی	۲	٦٦۲٥۸/۳۸	۳۳۱۲۹/۱۹۰	×	۱۷/٥۹
٥	سرعت دستگاه فنرپیچی	۲	۱۲۱۲۲/۲۰۷	٦۰٦۱/۱۰۳	×	۳/۲۲
٦	سرعت سنگ‌زنی	۲	۱۹۲۲/۸۱٤	۹٦۱/٤۰۷	×	۰/٥۱
۷	فشار سنگ‌زنی	۲	٦۲٤٦/۸٤۱	۳۱۳۳/٤۲۰	×	۱/٦٦
۸	زمان ساب	۲	۳۲۰۷/۷٥۹	۱٦۰۳/۸۷۹	×	۰/۸٥
خطا		۱۷۸٥	۰/۰۲٤	۰/۰۰۰۰۱۳٤	—	۰/۰۰۳
کل		۱۷۹۹	۳۷٦۷۱۸/٥۸٤	—	—	۱۰۰/۰۰

ـ اسمیرنف و لیون برای، به ترتیب نرمال بودن داده‌ها و همسانی واریانسهای تیماری تأیید شده است.

با ادغام افزایشی اثر عواملی که مشارکت آنها کمتر از ۱۰ درصد است با خطا، جداول تحلیل واریانس فوق به صورت جداول ٥ و ٦ به دست می‌آیند.

جدول ٥ جدول تحلیل واریانس ادغامی داده‌های S/N برای کاهش واریانس توزیع نیرو در طول F_1

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
٦	سرعت سنگ‌زنی	۲	٤٥/٤٦٦	۲۲/۷۳۳	٤/۱٤ *	۲٦/۹۸
خطا		۱٥	۸۲/۳٥٦	٥/٤۹	—	۷۳/۰۲
کل		۱۷	۱۲۷/۸۲۳	—	—	۱۰۰/۰۰

جداول تحلیل واریانس داده‌های S/N و اصلی که به ترتیب توصیف‌کنندهٔ وضعیت اثربخشی عوامل قابل کنترل فرایند فنر سوپاپ بر پراکندگی و انتقال میانگین توزیع مشخصهٔ کیفی نیرو در طول F1 است، بیانگر این موضوع است که فقط، عامل سرعت سنگ‌زنی با ۲٦/۹۸ درصد در کاهش پراکندگی و عوامل بادامک گام‌انداز و زاویهٔ گام‌انداز در فنر پیچی با به ترتیب ۷٥/۳۱ و ۱۷/٥۸ درصد

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٦ جدول تحلیل واریانس ادغامی داده‌های اصلی برای انتقال میانگین توزیع نیرو در طول F_1

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
٣	بادامک گام‌انداز در فنرپیچی	٢	٢٨٣٧٢٩/٦٩١	١٤١٨٦٤/٨٤٥	٩٥٢٦/٤٦٩ *	٧٥/٣١
٤	زاویهٔ گام‌انداز در فنرپیچی	٢	٦٦٢٥٨/٣٨	٣٣١٢٩/١٩٠	٢٢٢٤/٦٨٢ *	١٧/٥٨
خطا		١٧٩٥	٢٦٧٣٠/٥١١	١٤/٨٩١	—	٧/١١
کل		١٧٩٩	٣٧٦٧١٨/٥٨٤	—	—	١٠٠/٠٠

در انتقال میانگین توزیع موثر بوده و سایر عوامل، با درصدهای قابل اغمازی در هر دو پارامتر پراکندگی و میانگین توزیع موثرند اکنون برای انتخاب سطوح بهینهٔ عوامل نافذ به دست آمده، نخست باید میانگین حاشیه‌ای سطوح عوامل را محاسبه کرد و سپس سطوح عوامل مربوط به بزرگترین مقدار داده‌های S/N و کوچکترین مقدار داده‌های اصلی را به عنوان سطوح بهینه برگزید. دلیل انتخاب بزرگترین مقدار میانگین حاشیه‌ای داده‌های S/N، علامت منفی در دستور ریاضی بند پ معیارهای ارزیابی است و انتخاب کوچکترین مقدار میانگین حاشیه‌ای داده‌های اصلی به علت این است که داده‌های مورد محاسبه، انحرافات داده‌های اصلی از مقدار هدف آنها است. نتیجهٔ محاسبهٔ برآورد میانگینهای حاشیه‌ای سطوح عوامل نافذ به صورت جدول ٧ ارائه شده است.

جدول ٧ برآورد میانگین حاشیه‌ای سطوح عوامل نافذ ماتریس آزمایش فرایند تولید فنر سوپاپ

ردیف	عامل	سطح		
		١	٢	٣
٢	سرعت سنگ‌زنی	-٢٢/٨٨٠	-١٩/٤٣٥	-١٩/٥٨٧
٣	بادامک گام‌انداز در فنرپیچی	٢١/٦٣١	٣/٧٠٣	٣٤/٣٠٦
٤	زاویهٔ گام‌انداز در فنر پیچی	٢١/٤٤١	٢٦/٤٠٦	١١/٧٩٣

بنابراین سطوح بهینهٔ عوامل نافذ در کاهش پراکندگی و انتقال میانگین توزیع مشخصهٔ کیفی نیرو در طول F_1 عبارت است از:

١ـ سطح بهینهٔ عامل سرعت سنگ‌زنی برای کاهش پراکندگی توزیع، سطح دوم، یعنی ٢٥ دور در ثانیه است و

٢ـ سطوح بهینهٔ عوامل بادامک گام‌انداز و زاویهٔ گام‌انداز در فنر پیچی برای انتقال میانگین توزیع به ترتیب سطوح دوم و اول، یعنی L=٢٨٠ و R=١٣٠، و ٤٠ درجه است.

در این راستا، همانگونه که گفته شد چنانچه زاویهٔ بین خطوط برازش داده شدهٔ سطوح عوامل در نمودارهای اثرهای متقابل مرتبهٔ اول را به صورت شاخصی به نام شاخص شدت اثرهای متقابل در نظر گیریم و برآورد محاسبهٔ شدت اثرهای متقابل (جدول ٨) را بر پایهٔ صفر درصد برای زاویهٔ خطوط موازی و ١٠٠ درصد برای زاویهٔ خطوط ٩٠ درجه انجام دهیم، می‌توان تصمیم نهایی را برای سطوح بهینه اتخاذ کرد.

جدول ٨ شاخص شدت اثرهای متقابل عوامل برای داده‌های اصلی فرایند تولید فنر سوپاپ

ردیف	اثر متقابل	شماره ستون‌ها	شاخص شدت به درصد	سطوح بهینه
١	تعداد حلقه× فشار سنگ‌زنی	٢×٧	٨٧/٤٦	١و٢
٢	سرعت دستگاه× فشار سنگ‌زنی	٥×٧	٤٧/٦٩	٢و٣
٣	سرعت سنگ‌زنی× زمان ساب	٦×٨	٤٦/٧٤	١و١
٤	زاویهٔ گام‌انداز× سرعت سنگ‌زنی	٤×٦	٤٥/٨٩	٣و٢
٥	سرعت دستگاه×سرعت سنگ‌زنی	٥×٦	٣٣/٤٨	١و٣
٦	تعداد حلقه× زمان ساب	٢×٨	٣١/١٣	١و٢
٧	سرعت دستگاه× زمان ساب	٥×٨	٢٨/٥٢	٢و١
٨	بادامک گام‌انداز× سرعت دستگاه	٣×٦	٢٣/٤	٢و١
٩	زاویهٔ گام‌انداز× سرعت دستگاه	٤×٥	٢٢/٦٨	٣و٢
١٠	فشار سنگ‌زنی× زمان ساب	٧×٨	١٧/٩٨	٣و١
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
٢١	بادامک گام‌انداز× زاویهٔ گام‌انداز	٣×٤	١/٦٦	٣و٢

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به برآورد شاخص شدت برخی از اثرهای متقابل عوامل - که برای داده‌های اصلی در جدول ۸ محاسبه شده - اثر متقابل دو عامل نافذ بادامک گام‌انداز و زاویهٔ گام‌انداز، برابر ۱/٦٦ درصد ارائه شده که کاملاً قابل اغماض است. بنابراین از آنجا که عوامل دیگر در انتقال میانگین توزیع نافذ نبوده و در نتیجه برای انتقال میانگین مورد اغماض قرار گرفته‌اند، سطوح این عوامل را براساس سطوح بهینه جدول شاخص شدت اثرهای متقابل می‌توان تعیین کرد. برآورد جدول شاخص شدت اثرهای متقابل عامل نافذ برای داده‌های S/N بیانگر شدت ۱/۸٦ درصد است که مانند داده‌های اصلی قابل اغماض است.

از آنجا که ماهیت مشخصهٔ کیفی تعداد ترکهای سیلندر ترمز در فرایند پانچ‌زنی از نوع «هر چه کمتر بهتر» است مناسبتر است که از معیار ارزیابی بند ج استفاده شود. این نسبت علامت به اغتشاش (S/N) مهندسی استوار که مانند معیار ارزیابی ارائه شده در بند ب است اما با مقدار هدف برابر صفر ($\tau = 0$)، میانگین مجذورات انحرافات مشاهدات را از مقدار هدف (MSD) نشان می‌دهد. همانگونه که در ادبیات آمار آشکار است، میانگین مجذورات انحرافات از مقدار هدف، هر دو مؤلفهٔ اریبی (فاصلهٔ مقدار هدف از میانگین توزیع) و پراکندگی را شامل بوده و لذا، کاهش MSD با کاهش پراکندگی و انتقال میانگین توزیع به مقدار هدف معادل می‌شود. از طرف دیگر، نتایج حاصل از به‌کارگیری معیار ارزیابی بند ج، باید کلاً با نتایج توأم حاصل از دو معیار ارزیابی بندهای ح و خ نیز مطابقت داشته باشد. برای این منظور، نخست داده‌های اصلی را از طریق معیارهای ارزیابی بندهای ج، ح و خ تبدیل کرده و سپس روش تحلیل واریانس برای تعیین عوامل نافذ و تعیین میزان درصد مشارکت آنها استفاده می‌شود که نتایج محاسبات در جداول ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. مانند داده‌های آزمایش فرایند تولید فنر سوپاپ، شرایط لازم برای استفاده از تحلیل واریانس برای داده‌های آزمایش فرایند پانچ‌زنی نیز از طریق آزمونهای مذکور حاصل شده است.

جدول ۹ جدول تحلیل واریانس داده‌های S/N برای کاهش واریانس و انتقال میانگین توزیع تعداد ترکها

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۱	روش پانچ‌زنی	۱	۰/۳٥۷	۰/۳٥۷	۰/۰٦۷	۰/۰۰
۲	نوع مواد سیلندر	۱	۷/۲۹۲	۷/۲۹۲	۱/۳۷۲	۰/۲۱
۳	اندازهٔ پخ پانچ	۲	۷۰٤/۲٦٤	۳٥۲/۱۳۲	٦٦/۲٥٥ *	۷٥/۲۷
٤	سرعت رفت پانچ	۲	٤۰/۰۹٥	۲۰/۰٤۷	۳/۷۷۲	۳/۲۰
٥	سرعت برگشت پانچ	۲	۳۸/۳۸٥	۱۹/۱۹۲	۳/٦۱۱	۳/۰۱
٦	نیروی پانچ‌زنی	۲	٥۱/۱۳۹	۲٥/٥٦۹	٤/۸۱۱	٤/٤۰
۷	ضخامت دیواره	۲	٥۳/۳٥۹	۲٦/٦۷۹	٥/۰۱۹	٤/٦٤
خطا		٥	۲٦/٥۷۳	٥/۳۱٤	—	۹/۲۷
کل		۱۷	۹۲۱/٤٦۸	—	—	۱۰۰/۰۰

جدول ۱۰ جدول تحلیل واریانس داده‌های اصلی برای کاهش واریانس توزیع تعداد ترکها

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۱	روش پانچ‌زنی	۱	۲/۷۷۷	۲/۷۷۷	۰/۸۰۹	۰/۰۰
۲	نوع مواد سیلندر	۱	۸/٦۸۰	۸/٦۸۰	۲/٥۳۰	٤/۷۳
۳	اندازهٔ پخ پانچ	۲	۳٥/۳۸۸	۱۷/٦۹٤	٥/۱٥۷	۲٥/۷۳
٤	سرعت رفت پانچ	۲	٥/۷۲۲	۲/۸٦۱	۰/۸۳٤	۰/۰۰
٥	سرعت برگشت پانچ	۲	۱۸/۰٥٥	۹/۰۲۷	۲/٦۳۱	۱۰/۰۹
٦	نیروی پانچ‌زنی	۲	۱٤/۸۸۸	۷/٤٤٤	۲/۱۷۰	۷/۲٤
۷	ضخامت دیواره	۲	۸/۲۲۲	٤/۱۱۱	۱/۱۹۸	۱/۲۳
خطا		٥	۱۷/۱٥۲	۳/٤۳۰	—	٥۰/۹۸
کل		۱۷	۱۱۰/۸۸۸	—	—	۱۰۰/۰۰

با ادغام افزایشی اثر عواملی که مشارکت آنها کمتر از ۱۰ درصد است با خطا، جداول تحلیل واریانس فوق به ترتیب به صورت جداول ۱۲، ۱۳ و ۱٤ به دست می‌آید.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۱ جدول تحلیل واریانس داده‌های اصلی برای انتقال میانگین توزیع تعداد ترکها

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۱	روش پانچ‌زنی	۱	۱۱/۱۱۱	۱۱/۱۱۱	× ۱۲۷۸۵۹/۶	۲/۹۴
۲	نوع مواد سیلندر	۱	۱۵/۱۲۵	۱۵/۱۲۵	× ۱۷۴۰۵۰/۶۳	۴/۰۰
۳	اندازهٔ پخ پانچ	۲	۲۴۳/۵۰۰	۱۲۱/۷۵	× ۱۴۰۱۰۳۵/۶	۶۴/۴۶
۴	سرعت رفت پانچ	۲	۱۱/۱۶۶	۵/۵۸۳	× ۶۴۲۴۶/۲۶	۲/۹۶
۵	سرعت برگشت پانچ	۲	۳۹/۵۰۰	۱۹/۷۵	× ۲۲۷۲۷۲/۷۲	۱۰/۴۵
۶	نیروی پانچ‌زنی	۲	۲۴/۶۶۶	۱۲/۳۳۳	× ۱۴۱۹۲۱/۷۴	۶/۵۳
۷	ضخامت دیواره	۲	۳۲/۶۶۶	۱۶/۳۳۳	× ۱۸۷۹۵۱/۶۶	۸/۶۵
خطا		۲۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۸۶۹	—	۰/۰۱
کل		۳۵	۳۷۷/۷۳۶	—	—	۱۰۰/۰۰

جدول ۱۲ جدول تحلیل واریانس ادغامی داده‌های S/N برای کاهش واریانس و انتقال میانگین توزیع تعداد ترکها

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۳	اندازهٔ پخ پانچ	۲	۷۰۴/۲۶۴	۲۵۳/۱۳۲	× ۶۷۵/۳۰۳	۷۳/۲۸
خطا		۱۵	۲۱۷/۲۰۳	۱۴/۴۸	—	۲۶/۷۲
کل		۱۷	۹۲۱/۴۶۸	—	—	۱۰۰/۰۰

جدول ۱۳ جدول تحلیل واریانس ادغامی داده‌های اصلی برای کاهش واریانس توزیع تعداد ترکها

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۳	اندازهٔ پخ پانچ	۲	۳۵/۳۸۸	۱۷/۶۹۴	* ۳/۵۱۵	۲۲/۸۴
خطا		۱۵	۷۵/۴۹۹	۵/۰۳۳	—	۷۷/۱۶
کل		۱۷	۱۱۰/۸۸۸	—	—	۱۰۰/۰۰

جدول تحلیل واریانس شمارهٔ ۹ و داده‌های S/N ادغامی آن با شمارهٔ ۱۲ - که توصیف‌کنندهٔ وضعیت اثربخشی عوامل قابل کنترل فرایند پانچ‌زنی سیلندرهای ترمز دو مداره بر پراکندگی و انتقال میانگین توزیع مشخصهٔ کیفی تعداد ترکها به سمت هدف (صفر) است - و همچنین

جدول ۱۴ جدول تحلیل واریانس ادغامی داده‌های اصلی برای انتقال میانگین توزیع تعداد ترکها

ردیف	عامل	درجهٔ آزادی	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	نسبت F	درصد مشارکت
۳	اندازهٔ پخ پانچ	۲	۲۴۳/۵	۱۲۱/۷۵	* ۲۹/۹۳	۶۲/۳۱
خطا		۳۳	۱۳۴/۲۳۶	۴/۰۶۷	—	۳۷/۶۹
کل		۳۵	۳۷۷/۷۳۶	—	—	۱۰۰/۰۰

جداول تحلیل واریانس ۱۰ و ۱۱ و ادغامی آنها به شماره‌های ۱۳ و ۱۴ - که توصیف‌کنندهٔ وضعیت اثربخشی عوامل قابل کنترل آن فرایند به ترتیب بر پراکندگی و میانگین توزیع هستند - بیانگر این موضوع است که تنها عامل مهم اثرگذار بر پراکندگی و میانگین توزیع تعداد ترکها، اندازهٔ پخ پانچ با سهم مشارکتی توأم معادل ۷۳ درصد است. همانگونه که پیشتر پیش‌بینی شد، نتایج حاصل از به‌کارگیری معیار ارزیابی بند ج با نتایج توأم حاصل از دو معیار ارزیابی بندهای ح و خ تطابق دارند.

اکنون برای انتخاب سطوح بهینهٔ عوامل نافذ به دست آمده، مانند فرایند تولید فنر سوپاپ، نخست باید میانگین حاشیه‌ای سطوح عوامل را محاسبه کرده و آنگاه سطوح عوامل مربوط به بزرگترین مقدار میانگین حاشیه‌ای داده‌های S/N و کوچکترین مقدار میانگین حاشیه‌ای داده‌های اصلی را به عنوان سطوح بهینه برگزید. دلیل انتخاب بزرگترین مقدار میانگین حاشیه‌ای داده‌های S/N منفی بودن در دستور ریاضی بند ج معیارهای ارزیابی است و دلیل انتخاب کوچکترین مقدار میانگین حاشیه‌ای داده‌های اصلی مربوط به پراکندگی و میانگین به ترتیب، ماهیت پراکندگی و ماهیت مشخصهٔ کیفی تعداد ترک است. نتیجهٔ محاسبهٔ برآورد میانگینهای حاشیه‌ای سطوح عوامل نافذ به صورت جدول ۱۵ ارائه شده است.

همانگونه که از اطلاعات جدول ۱۵ مشخص است، سطح بهینهٔ عامل نافذ اندازهٔ پخ پانچ، با هدف کاهش پراکندگی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۵ برآورد میانگینهای حاشیه‌ای سطح عامل نافذ ماتریس آزمایش فرایند پانچ‌زنی سیلندرهای ترمز

ردیف	اندازهٔ بخ پانچ	سطح		
		I	II	III
۱	در داده‌های S/N	-٤/٨٥	-١/٦٦٧	-١٦/٢٣٨
۲	در داده‌های اصلی برای پراکندگی	۰/۵۸۹	۰/۱۱۷	۳/۲۹۹
۳	در داده‌های اصلی برای انتقال میانگین	۱/۷۵	۱/۲۵	۷

و انتقال میانگین (به سمت مقدار هدف صفر) توزیع مشخصهٔ کیفی تعداد ترکهای سیلندرهای ترمز دو مداره که در مرحلهٔ پانچ زنی ایجاد می‌شود، سطح دوم آن عامل، یعنی اندازهٔ حداقل بخ، است. در این راستا، با توجه به شاخص شدت اثرهای متقابل (جدول ١٦)، نه تنها اثر متقابل عامل نافذ با عوامل غیرنافذ ناچیز است،

جدول ١٦ شاخص شدت اثرهای متقابل عوامل برای داده‌های S/N فرایند پانچ‌زنی سیلندر ترمز

ردیف	اثر متقابل	شمارهٔ ردیف‌ها	شاخص شدت به درصد	سطوح بهینه
۱	نوع مواد سیلندر× ضخامت دیواره	۲×۷	۸۹/۶۹	۱و۲
۲	روش پانچ‌زنی× سرعت رفت پانچ	۱×٤	۷۲/۰۷	۱و۲
۳	نوع مواد سیلندر× نیروی پانچ‌زنی	۲×٦	٦۰/۵٦	۱و۱
٤	روش پانچ‌زنی× نوع مواد سیلندر	۱×۲	۵٦/۳۵	۱و۲
۵	روش پانچ‌زنی× ضخامت دیواره	۱×۷	٤۷/۷۱	۱و۲
٦	نوع مواد سیلندر×سرعت رفت پانچ	۲×٤	٤۲/۰۱	۲و۲
۷	سرعت رفت پانچ× نیروی پانچ‌زنی	٤×٦	۲۹/۸۷	۳و۲
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
۲۱	اندازهٔ بخ پانچ× ضخامت دیواره	۳×۷	۱/۱	۲و۲

بلکه سطح بهینه عامل اندازهٔ بخ پانچ در جدول اثرهای متقابل دو به دوی عوامل نیز، همان سطح دوم عامل نافذ است که براساس میانگینهای حاشیه‌ای سطوح عامل تعیین شده بود.

۵- صحه گذاری و نتایج

به منظور تعیین میزان صحت نتایج نظری به دست آمده و مقایسه با واقعیتهای موجود در سطح عملیاتی، تعداد ۳۰ و ۳۰ قطعه فنر سوپاپ و تعداد ٤۰۰۰ و ۳۳۲ قطعه سیلندر ترمز دو مداره - به ترتیب تحت شرایط جاری و پیشنهادی (بهینه) - تولید شد که خلاصه‌ای از معیارهای توصیفی آنها در جدول شمارهٔ ۱۷ آورده شده است.

جدول ۱۷ مقایسهٔ معیارهای توصیفی شرایط جاری و پیشنهادی فرایندهای مورد بررسی

فرایند	شرایط جاری	شرایط پیشنهادی
تولید فنر سوپاپ	۱ـ درصد اقلام نامنطبق = ۹٦/۷۷ ۲ـ میانگین نیرو در طول F_1 = ۳۲۳/۲۰	۱ـ درصد اقلام نامنطبق = ٦/٦۷ ۲ـ میانگین نیرو در طول F_1 = ۲۸٤/۹۳
پانچ زنی سیلندر ترمز دو مداره	۱ـ درصد تعداد ترک = ۳ درصد	۱ـ درصد تعداد ترک = ۰/۳ درصد

بدین ترتیب، درصد پیشرفت بهبود در وضعیت‌های پیشنهادی برای کاهش تعداد اقلام نامنطبق فنر سوپاپ و کاهش تعداد ترکهای سیلندر ترمز، نسبت به وضعیت‌های قبل از اجرای پروژه (وضعیت‌های جاری)، به ترتیب عبارت است از:

درصد پیشرفت بهینه‌سازی فرایند تولید فنر سوپاپ نسبت به وضعیت قبل از اجرای پروژه

$$= \left(\frac{۹۶/۷۷}{۶/۶۷} - ۱\right) \times ۱۰۰ = ٪۱۳۵۰/۸۲$$

درصد پیشرفت بهینه‌سازی فرایند پانچ‌زنی سیلندر ترمز نسبت به وضعیت قبل از اجرای پروژه

$$= \left(\frac{۳}{۰/۳} - ۱\right) \times ۱۰۰ = ٪۹۰۰/۰۰$$

به بیان دیگر، پیشرفت کاهش تعداد فنرهای سوپاپ نامنطبق - که براساس مشخصهٔ کیفی نیرو در طول F_1 ارزیابی شده - و پیشرفت کاهش تعداد ترکهای سیلندر

www.SID.ir

Archive of SID

ترمز دو مداره در مرحلهٔ پانچ‌زنی، به ترتیب برابر ۱٤/٥ و ۱۰ برابر وضعیتهای قبل از اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی در فرایندهای مربوط است. این نتایج در شرایطی به دست آمده که پروژه‌های بهینه‌سازی در فرایندهای مذکور، بدون هیچگونه سرمایه‌گذاری اضافه در عوامل تولید انجام شده است. با توجه به تولید سالانهٔ ۱,۰۰۰,۰۰۰ قطعه از این نوع فنر سوپاپ و تولید سالانهٔ ۷۰,۰۰۰ قطعه از سیلندرهای ترمز دو مداره در شرکتهای مورد مطالعه و قیمتهای اسقاطی به ترتیب ۲,۷۰۰ و ۱۰۰,۰۰۰ ریال، پس‌انداز سالانه در نتیجهٔ اجرای شرایط پیشنهادی برای هر یک از شرکتها به ترتیبه قرار زیر است:

(۲۷۰۰)(۱۰۰۰۰۰۰)(٪٦/٦٧_٪۹٦/۷۷) = ۲,٤۳۲,۷۰۰,۰۰۰ ریال

(٪۳_٪۰/۳)(۷۰۰۰۰)(۱۰۰۰۰۰) = ۱۸۹,۰۰۰,۰۰۰ (٪۳)

اگرچه در بیشتر شرکتهای تولیدی کشورهایی مانند ایران، این ضررهای کیفی و تبعات هزینه‌ای (عوارض جانبی) ناشی از این ضررها به مشتریان نهایی منتقل می‌شود و ممکن است این ضررهای اجتماعی در نظر صاحبان صنایع بی‌اهمیت جلوه کند، اما در کشورهایی که در آنها رقابت سالم در جریان است، توجه به این ضررهای عملکردی و عوارض جانبی آنها حیاتی است. زیرا عدم توجه به این مهم، به از دست دادن حسن اعتماد مشتریان نهایی و در نتیجه از دست دادن سهم بازار محصول منجر می‌شود که بالغ بر میلیاردها ریال است.

٦- منابع

[1] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Taguchi, S.; Robust Engineering; McGraw-Hill; 2000; pp. 1-9.

[2] Taguchi, G.; "System of Experimental Designs"; Edited by Don Clausing; New York; UNIPUB/Kraus International Publications; Vol. 1 and 2; 1987.

[3] Roy, K.; Ranjit, Design of Experiments Using the Taguchi Approach; John Wiley & Sons, inc.; NY; 2001.

[4] Shoemaker, A. C.; Tsui, K. K.; and Wu, C. F. J.; "Economical Experimentation Methods for Robust Design"; Technometrics; Vol. 33; No. 4; 1991.

[5] Bameni Moghadam, M.; "Application of Robust Engineering Method in Oil Pump Housing Production Process"; International Journal of Engineering Science; April; 2004.

[6] Phadke, S.M.; Quality Engineering Using Robust Design; Prentice Hall, Englewood Cliffs; N. J; 1989.

[7] Kolarik, W. J.; Creating Quality; Mc Graw-Hill; 1995.

www.SID.ir