

طراحی یک مدل بهینه‌سازی اثرزدا با استفاده از تابع زیان کیفی تاگوچی

امیر پرنیانی فرد*

دانشکده مهندسی مکانیک و ساخت و تولید، دانشگاه پوترای مالزی-UPM، سلانگور، مالزی.

چکیده

تابع زیان کیفی تاگوچی یکی از ابزارهای کاربردی مورد استفاده در تکنیک طراحی اثرزدا می‌باشد که به صورت هم‌زمان میزان انحراف از مقدار هدف و واریانس مشخصه‌ی کیفی خروجی فرآیند را مورد توجه قرار می‌دهد. در شرایط واقعی بیش‌تر فرآیندها تحت تأثیر فاکتورها و عوامل خارجی و محیطی غیر قابل کنترل قرار داشته که باعث فاصله گرفتن مشخصه‌های کیفی فرآیند از نقاط ایده‌آل و ایجاد نوسان در مقدار این مشخصه‌ها می‌شوند. در این تحقیق، استفاده از تابع زیان کیفی تاگوچی جهت مدل‌سازی فرآیند و انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای ورودی به فرآیند مورد توجه قرار گرفته و اشاره گردیده است که تابع معرفی شده توسط تاگوچی در عین کارایی همانند بسیاری دیگر از تکنیک‌های معرفی شده در مهندسی کیفیت، دارای محدودیت‌هایی در مدل‌سازی فرآیند است که به جهت رفع این محدودیت‌ها، تابع زیان کیفی توسعه‌یافته معرفی و یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی به کمک تابع ذکر شده باهدف حداقل‌سازی اثرات متغیرهای مزاحم در فرآیند ارائه می‌گردد. در پایان، نحوه‌ی به‌کارگیری مدل معرفی شده جهت انتخاب بهینه مقدار پارامترهای ورودی در قالب یک مثال عددی نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی اثرزدا، فرآیند، روش تاگوچی، تابع زیان کیفی.

پذیرش: ۱۳۹۸/۱/۲۴

اصلاح: ۱۳۹۸/۱/۲۱

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

۱- مقدمه

طراحی اثرزدا^۱ یک رویه‌ی مهندسی جهت بهینه کردن شرایط فرآیند و محصول است که هدف آن کاستن از حساسیت فرآیند و محصول نسبت به عوامل متغیر محیطی می‌باشد. تنها راه افزایش کیفیت محصولات و خدمات، استفاده از تکنولوژی بالاتر، مواد اولیه‌ی گرانتر (با کیفیت عالی) و نیروی انسانی باتخصص بالا نیست. طراحی اثرزدا، یک راه مؤثر و ساخت‌یافته برای دستیابی به این ابزار رقابتی، روش جدید بهینه‌سازی، طراحی برای عملکرد، کیفیت و هزینه می‌باشد (شاهین، ۲۰۰۶). در این تحقیق از یکی از مفاهیم اصلی در طراحی اثرزدا بنام تابع زیان کیفی^۲ تاگوچی جهت مدل‌سازی فرآیند و انتخاب سطوح بهینه‌ی فرآیند استفاده می‌گردد. استفاده از تابع مذکور به تنهایی دارای محدودیت‌هایی است که هدف اصلی پژوهش، ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته می‌باشد که پوشش دهنده این محدودیت‌ها می‌باشد.

^۱Robust design^۲Quality loss function



در بخش دوم این پژوهش این محدودیت‌ها مورد اشاره قرار گرفته است. لازم به ذکر است این محدودیت‌ها مشترکاً به بسیاری از تکنیک‌های دیگر مهندسی کیفیت نیز وارد می‌گردد.

زمانی که ژاپن کار بازسازی خود را پس از جنگ جهانی دوم آغاز کرد با کمبود شدید مواد خام، تجهیزات باکیفیت و مهندسین ماهر روبه‌رو شد و رقابت برای تولید محصولات باکیفیت بالا و تداوم بهبود کیفیت را تحت آن شرایط آغاز کرد. کار اجرای یک متدولوژی برای برخورد با مسئله‌ی رقابت با دکتر جنیشی ناگوچی^۱ که در آن زمان مهندس مسئول توسعه‌ی محصولات مخابراتی ویژه در آزمایشگاه‌های ارتباطات الکتریکی (ای.سی.ال)^۲ بود، واگذار شد. وی به کمک تحقیقاتش در سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ اصول طراحی اثرزدا را توسعه داد و اساس کار خود را با به‌کار بستن نظریه‌هایش در توسعه‌ی محصولات مختلف اعتبار بخشید. دکتر ناگوچی با معرفی این روش، جایزه‌ی دمنینگ را در سال ۱۹۶۲ دریافت کرد که یکی از معروف‌ترین جایزه‌های کیفیت می‌باشد. روش طراحی اثرزدا در طیف گسترده‌ای از مسائل قابل استفاده است، این روش نقش عمده‌ای را در رشد سریع صنعت و تسخیر بازارهای جهانی در صنایعی مثل خودروسازی، الکترونیک، شیمی و... در ژاپن داشته است. طراحی اثرزدا، از ایده‌های مختلف طراحی آزمایش آماری تا طراحی آزمایش‌ها^۳ برای کسب اطلاعات مورد اعتماد، در مورد متغیرهای مربوط به تصمیمات مهندسی، استفاده می‌کند. دانش طراحی آزمایش‌های آماری از کار رونالد فیشر^۴ در سال ۱۹۲۰ در انگلستان سرچشمه می‌گیرد. فیشر اصول طراحی آزمایشی را پایه‌ریزی کرده و تکنیک تجزیه و تحلیل داده‌ها موسوم به تحلیل واریانس (آنووا)^۵ را در تلاش برای بهبود فرآورده‌های کشاورزی ابداع کرد (خدایوندی، ۱۳۸۱). پس از آن استفاده از مباحث مربوط به طراحی اثرزدا و کاربرد فراوان آن در کلیه‌ی صنایع روند چشمگیری داشته و هم‌اکنون در ایالات متحده، ژاپن و سایر کشورها به سرعت رشد کرده و انتظار می‌رود در دهه‌ی آینده این روش و کاربردهای آن رشد بیش‌تری از خود نشان دهند. در ادامه، برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه مورد اشاره قرار می‌گیرد.

فتاحی و همکاران (۱۳۸۴) یک مدل تلرانس دهی به منظور تنظیم حدود کنترل برای مشخصه‌های قطعات را ارائه نموده و تفکیک و لزوم ایجاد تبادل مناسب بین هزینه‌ی تولید و زیان کیفی را مطرح می‌نمایند. نقی خانی و علیجانی (۱۳۸۹) تشخیص تلرانس‌های بحرانی و تخصیص تلرانس بهینه در حالتی که هزینه‌ی تولید بهینه می‌گردد را به کمک رویه‌ی سطح پاسخ در پژوهشی ارائه کردند. سان و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی با استفاده از ساختار مدل بهینه‌سازی چندهدفه اثرزدا اقدام به طراحی پارامترها با در نظر گرفتن فاکتورهای اختلال جهت طراحی ورقه‌های فلزی با قابلیت شکل‌پذیری مناسب نموده‌اند. بیوک آقازاده (۲۰۱۰) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی اثرزدا برای حل مسئله‌ی انتخاب سهام برتر با هدف کاهش واریانس و ماکزیمم سازی بازگشت سرمایه را ارائه نموده است. دایز و پری (۲۰۱۰) در پژوهشی یک فرمول بندی عمومی با توجه به شرایط نامشخص و متغیر محیط و اپراتور و با در نظر گرفتن طراحی اثرزدا جهت طراحی مفهومی حاملهای اجسام ارائه نموده‌اند. کمالی اردکانی و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی روشی در مطالعات اثرزدائی و هم‌چنین چند مدل‌سازی مختلف باهدف اثرزدائی، فرآیند را به همراه یک مثال عددی ارائه نمودند. بیر و سندهاف (۲۰۰۷) در پژوهشی، مدل‌ها و روش‌های مختلف بهینه‌سازی اثرزدا را مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند. شاهین (۲۰۰۶) در پژوهشی طراحی اثرزدا را به شکل جامعی توصیف کرده و پیرامون این دیدگاه بیان می‌کند طراحی اثرزدا یک دیدگاه انقلابی در مهندسی و طراحی کیفیت است و یک شکاف معنی‌دار را در طراحی تولید و فرآیند با مینی‌مم‌سازی اثرات نیروهای خارجی مانند اثرات محیط، کارفرما و شرایط تولید به وجود آورده است. چن (۲۰۰۴) مسئله طراحی اثرزدا در محیط فازی را مطرح کرده و از توصیف توابع عضویت خطی برای آرام‌سازی شرایط فرآیند نسبت به میانگین و واریانس استفاده نموده است. مساک و اسماعیل-یاهایا (۲۰۰۲) با کلاس بندی مسائل و تعریف حدود عملکرد برای توابع هدف، برای هر کلاس، یک مدل پیشنهادی را ارائه نمودند. کراسلاوسکی و همکاران (۱۹۹۳) مسائل طراحی اثرزدا را با یک مدل بهینه‌سازی فازی ارائه نمودند و کارائی مدل خود را به وسیله یک مثال عددی نشان دادند. شاهین و پرنیانی فرد (۱۳۹۱) در پژوهشی دیگری یک مدل چند هدفه غیر خطی را جهت بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی از نوع امتزاج به کمک مفاهیم طراحی اثرزدا ارائه نمودند. قبادی و همکاران (۱۳۸۵) به بررسی طراحی آزمایشات در محیط فازی پرداخته و متغیر پاسخ را به صورت یک عامل فازی (کیفی) در نظر گرفته‌اند. شهریاری و نباتچیان (۱۳۸۶) در پژوهشی یک مدلسازی ریاضی را برای یک مدل مونتاژ قطعات جهت طراحی پارامترهای

^۱Genechi Taguchi

^۲Electrical Communication Library (ECL)

^۳Design of Experiments (DOE)

^۴Ronald fisher

^۵Analysis of Variance (ANOVA)

تولید ارائه می کند و اینگونه بیان می کنند که مبحث ورود کیفیت به چرخه ساخت یک محصول، موضوع جدی و مهمی است که تا مدتها مورد بحث کارشناسان قرار گرفته است.

امروزه، کاربرد و توسعهی طراحی اثرزدا و مدل های بهینه سازی بر مبنای طراحی اثرزدا در مطالعات مختلف و کاربردهای گوناگون مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. پرنیانی فرد و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به صورت مروری به بررسی آخرین کاربردها و توسعهی طراحی اثرزدا در صنایع مختلف پرداخته اند. هم چنین در پژوهشی دیگر، پرنیانی فرد و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تلفیق طراحی اثرزدا با دیگر متد بهینه سازی از جمله متامدل ها پرداخته اند. کاربرد طراحی اثرزدا بر مبنای دیدگاه تاگوچی در مطالعات مختلف و تلفیق آن با روش های دیگر بهینه سازی از جمله متامدل ها در پژوهش های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است از جمله مقالات دلینی و مولینی (۲۰۱۵)، مقدم و مهلوجی (۲۰۱۶) و خوشنویسان و همکاران (۲۰۱۷).

تکنیک های معرفی شده در مباحث مهندسی کیفیت علاوه بر کارائی مناسب در کنترل و به سازی کیفیت در فرآیندهای مختلف دارای محدودیت و نواقصی می باشند که در این پژوهش، این محدودیت ها در طراحی ساختار مدل سازی مدنظر قرار می گیرد. در ذیل به تعدادی از این محدودیتها اشاره می گردد:

- عدم در نظر گرفتن هزینهی تأمین، تنظیم فاکتورها و ایجاد ساختار فرآیند بر روی سطحی خاص. به عنوان مثال در مفهوم طراحی اثرزدا به کمک طراحی آزمایشات و یا آرایه های متعامد، تنها هدف، تعیین سطوح بهینه ای از فاکتورهای ورودی فرآیند می باشد به نحوی که مشخصه ی کیفی خروجی فرآیند در نزدیک ترین مقدار به نقطه ی هدف و با حداقل واریانس قرار گیرد در صورتی که در بسیاری از فرآیندها هزینه ی تأمین و انتقال از یک سطح به سطح دیگر متفاوت می باشد. به عبارتی دیگر زیان کیفی (بر اساس آموزه های تاگوچی) با نزدیک شدن مقدار مشخصه ی کیفی خروجی به مقدار هدف کاهش می یابد در صورتی که هزینه ی تأمین (تولید) با نزدیک شدن مشخصه ی کیفی^۱ به مقدار هدف افزایش می یابد. این هزینه شامل استفاده از دستگاهها و تجهیزات پیچیده تر، مواد اولیه گران تر، نیروی انسانی با تخصص بیشتر و ... می باشد، لذا لازم است در مدل سازی فرآیند، تبادل مناسب بین هر دو هزینه مدنظر قرار گیرد.
- در بسیاری از تکنیکهای مهندسی کیفیت، تنها بهینه سازی یک مشخصه ی کیفی در هر بار اجرای تکنیک صورت می پذیرد که لازم است مدلی طراحی گردد که هم زمان بهینه سازی فرآیند را با در نظر گرفتن کلیه ی مشخصه های کیفی و برای هر سه نوع مشخصه ی کیفی از نوع اسمی بهتر^۲، کوچک تر بهتر^۳ و بزرگ تر^۴ بهتر مدنظر قرار دهد.
- در بسیاری از مدل سازی فرآیندها، پارامترهای وارد شده در مدل مجهول بوده و دارای برآورد مناسبی نمی باشند. به عنوان مثال، میانگین، نقطه ی هدف و واریانس مشخصه ی کیفی خروجی در تابع زیان کیفی تاگوچی پارامترهایی هستند که نیاز است هم زمان با مدل سازی، روشی جهت برآورد مناسب این پارامترها با در نظر گرفتن شرایط فرآیند از جمله روابط متقابل فاکتورهای ورودی ارائه گردد. در این پژوهش وجود روابط متقابل دوگانه بین فاکتورهای ورودی مجاز می باشد و از روابط مرتبه های بالاتر صرف نظر می گردد.
- عدم ارجعیت و وجود وزن یکسان بین دو معیار میزان انحراف از نقطه ی هدف و واریانس مشخصه ی کیفی در تابع زیان کیفی تاگوچی از دیگر محدودیت های این تابع می باشد که باتوجه به شرایط حاکم بر فرآیند و مدل سازی نیاز است وزن و ارجعیت مناسب به این دو معیار اختصاص یابد.
- در نظر گرفتن حدود مشخصات فنی ارائه شده توسط مشتریان در مدل، از دیگر مواردی است که لازم است در مدل سازی مدنظر قرار گیرد.
- لازم است وجود محدودیت های سیستمی در انتخاب سطوح بهینه ی فاکتورهای ورودی باتوجه به ماهیت و شرایط حاکم بر فرآیند در طراحی مدل مدنظر قرار گیرد.
- برخی روشها مانند طراحی آزمایشات و آرایه های متعامد، تنها، سطوح گسسته ای از فاکتورهای ورودی را مورد بررسی قرار می دهند در صورتی که مدل ارائه شده در این روش، کلیه ی مقادیر مثبت را برای فاکتورهای ورودی به صورت پیوسته در نظر می گیرد.

¹Quality Specification

²Nominal is Best

³Smaller is better

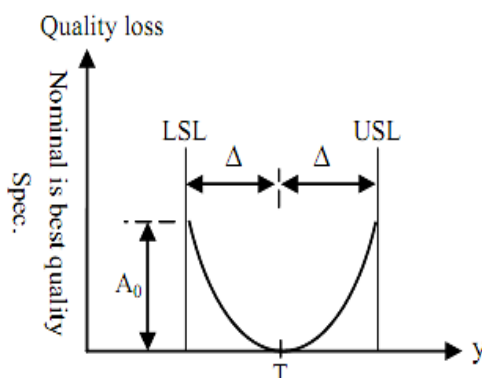
⁴Larger is better



۲- تعریف مفاهیم به کاررفته در پژوهش

دکتر تاگوچی، زیان کیفی وارد شده به فرآیند، ناشی از انحراف هر مشخصه‌ی کیفی نسبت به مقدار هدف تعیین شده را مطابق معادله (۱) تعریف می‌کند. این رابطه نشان‌دهنده متوسط مجذور خطا (انحراف از هدف) می‌باشد. شکل ۱ این رابطه را به صورت شماتیک برای مشخصه‌های کیفی از نوع اسمی بهتر نشان می‌دهد.

$$Q = E[(y - t)^2] = [(y - t)^2 + \sigma^2] \quad (1)$$



شکل ۱- تابع زیان کیفی برای مشخصه‌ی کیفی از نوع اسمی بهتر.

اگر $y_j = y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ به ترتیب نشان دهنده‌ی تعداد n پارامتر ورودی فرآیند و m مشخصه‌ی کیفی خروجی فرآیند باشند، وابستگی j امین مشخصه کیفی محصول (y_j) با پارامترهای کنترل ورودی (x_i) مطابق معادله زیر تعریف می‌گردد:

$$y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = \hat{\beta}_0^j + \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_i^j x_i + \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_{ii}^j x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^n \hat{\beta}_{ip}^j x_i x_p, \text{ for } j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

معادله (۲) رابطه‌ی بین مشخصه‌ی کیفی خروجی (متغیر پاسخ) و متغیرهای ورودی فرآیند را به صورت یک مدل چند جمله‌ای مرتبه‌ی دوم برآورد می‌نماید. در این رابطه $\hat{\beta}_0^j, \hat{\beta}_i^j, \hat{\beta}_{ii}^j$ و $\hat{\beta}_{ip}^j$ برآورد اثرهای ثابت، خطی، درجه‌ی دوم و متقابل دوگانه بین فاکتورهای ورودی به فرآیند می‌باشند. این مدل توانایی زیادی برای نمایش حالت‌های مختلف توابع منحنی دارد و پارامترهای این مدل به راحتی از روش حداقل مربعات معمولی قابل برآورد کردن می‌باشد. هم‌چنین از طریق تجربی ثابت شده است مدل مرتبه‌ی دوم که نشان‌دهنده اثرات متقابل دوگانه بین فاکتورهای ورودی است جهت مدل‌سازی و بهسازی فرآیند مناسب‌تر می‌باشد و می‌توان از اثرات متقابل مرتبه‌ی سوم و بالاتر صرف‌نظر نمود (نقی‌خانی و علیجانی، ۱۳۸۹). با توجه به وجود روابط متقابل دوگانه در رابطه‌ی بین مشخصه‌ی کیفی و فاکتورهای ورودی فرآیند میانگین و واریانس مشخصه‌ی کیفی حاصل از تنظیم فاکتورهای ورودی در سطحی مشخص، از معادله‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد. روابط $E(y_j)$ و $Var(y_j)$ از بسط سری تیلور مرتبه‌ی دوم حاصل می‌گردد و از جملات با مرتبه‌ی سوم و بالاتر صرف‌نظر گردیده است.

$$E(\underline{y}_j) = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^n \frac{\partial^2 f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i \partial x_p} \sigma_{ip} \quad (3)$$

$$Var(\underline{y}_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^n \frac{\partial f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_p} \sigma_{ip} \quad (4)$$

در معادلات فوق، عبارت σ_{ip} به صورت معادله‌ی (۵) تعریف می‌گردد.

$$\sigma_{ip} = Cov(x_i, x_p) \text{ if } i \neq p \text{ and } Var(x_i) \text{ if } i = p \quad (5)$$

جهت مطالعات بیشتر پیرامون نحوه‌ی اثبات روابط فوق به (چندرا، ۲۰۰۱) مراجعه گردد.



۳- تعریف مسأله

هدف از این پژوهش ارائه یک مدل بهینه‌سازی فرآیند با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌ها و موارد مورد اشاره در بخش (۲) پژوهش جاری و با تعریف تابع زیان کیفی توسعه‌یافته می‌باشد. مدل زیر شمای کلی مدل بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

$$\text{Minimize } (Tc) = Q_e^G + Q_e^L + Q_e^S + Pc \quad (۶)$$

Subject to:

$$\text{System's Constraint} \quad (۷)$$

$$X_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad (۸)$$

معادله‌ی (۶) نشان‌دهنده تک تابع هدف غیر خطی مورد استفاده در مدل از نوع کمینه‌سازی می‌باشد (مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه غیر خطی از نوع کمینه‌سازی) و مجموع زیان‌های کیفی مشخصه‌های کیفی فرآیند و هزینه‌ی تأمین مشخصه‌ها را نشان می‌دهد. از خصوصیات تابع مذکور، هم مقیاس بودن کلیه عبارات‌های تشکیل‌دهنده آن می‌باشد که همگی مشترکاً با مقیاس هزینه در مدل وارد می‌شوند. معادله‌ی (۷) نشان‌دهنده محدودیت‌های سیستمی در انتخاب سطوح بهینه‌ی فاکتورهای ورودی با توجه به ماهیت و شرایط حاکم بر فرآیند می‌باشد. معادله‌ی (۸) به‌عنوان محدودیت در انتخاب مقادیر مثبت فاکتورهای ورودی لحاظ گردیده است. عبارات‌های Q_e^G, Q_e^L, Q_e^S, Pc به‌عنوان اجزاء تشکیل‌دهنده تابع هدف در مدل بهینه‌سازی ارائه‌شده، به‌ترتیب، هزینه‌ی تأمین، تابع زیان کیفی توسعه‌یافته برای مشخصه‌های کیفی از نوع اسمی بهتر، بزرگ‌تر بهتر و کوچک‌تر بهتر می‌باشند که در ادامه پژوهش مورد بحث قرار می‌گیرند.

۳-۱- هزینه‌ی تأمین

عبارت Pc در معادله‌ی (۶) کل هزینه‌ی تأمین محصول (خروجی فرآیند) را نشان می‌دهد که تابعی از فاکتورهای ورودی به فرآیند می‌باشد. این رابطه به‌صورت معادله‌ی (۹) تعریف می‌گردد. هزینه‌ی تأمین همانند دیگر مشخصه‌های کیفی می‌تواند به‌صورت یک رابطه‌ی خطی و یا غیر خطی از پارامترهای ورودی به فرآیند و در قالب معادله‌ی (۲) تعریف گردد.

$$Pc = h(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (۹)$$

۳-۲- زیان کیفی توسعه‌یافته برای مشخصه‌های اسمی بهتر

اگر $G = 1, 2, \dots, g$ نشان‌دهنده مشخصه‌های کیفی از نوع اسمی بهتر فرآیند باشند آن‌گاه عبارت Q_e^G در معادله‌ی (۶) تابع زیان کیفی توسعه‌یافته برای کلیه مشخصه‌های کیفی از نوع اسمی بهتر در فرآیند می‌باشد و به‌صورت معادله (۱۰) تعریف می‌گردد.

$$Q_e^G = \sum_{G=1}^g K'_G [W_G(E(\underline{y}_G) - T_G)^2 + (1 - W_G)Var(\underline{y}_G)] \quad (۱۰)$$

عبارت T_G نشان‌دهنده نقطه‌ی بهینه در نظر گرفته شده برای مشخصه‌ی کیفی G ام و به کمک حدود بالا و پائین مشخصات فنی تعیین شده توسط مشتریان $(USL)_G, (LSL)_G$ برای مشخصه‌ی کیفی از نوع اسمی بهتر، مطابق معادله‌ی (۱۱) و با فرض قرار گرفتن نقطه‌ی بهینه‌ی درست در وسط، بین حدود مشخصات فنی حاصل می‌گردد. ضریب W_G میزان ارجعیت مقدار انحراف از هدف را نسبت به واریانس مشخصه‌ی کیفی G ام از نوع اسمی بهتر نشان می‌دهد. K'_G ضریب ثابت زیان کیفی است و مجموع انحرافات را به مقیاس هزینه تبدیل می‌نماید. ضریب مذکور با در نظر گرفتن حدود مشخصات فنی مشتریان، مطابق معادله‌ی (۱۲) محاسبه می‌گردد.



$$T_G = \frac{1}{2} [(USL)_G + (LSL)_G] , for G = 1, 2, \dots, g \quad (11)$$

$$K'_G = 4A_0 [(USL)_G - (LSL)_G]^{-2} , for G = 1, 2, \dots, g \quad (12)$$

عبارت A_0 در معادله (۱۲) هزینه وارد شده به سیستم بابت خارج شدن مقدار مشخصه خروجی از حدود مشخصات فنی مشتریان می باشد از جمله هزینه های اصلاحی، دوباره کاری و ... هم چنین فرض گردیده است که این هزینه برای خارج شدن از حد بالا برابر با خارج شدن از حد پائین فنی مشتریان می باشد (شکل ۱).

۳-۳- زیان کیفی توسعه یافته برای مشخصه های بزرگ تر بهتر

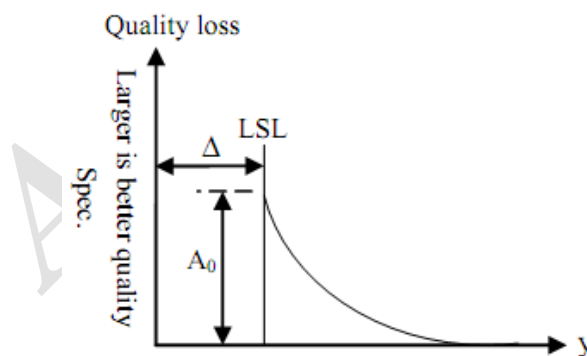
اگر $L = 1, 2, \dots, l$ نشان دهنده مشخصه های کیفی از نوع بزرگ تر بهتر فرآیند باشند آن گاه عبارت Q_e^L در معادله (۶) مشخص کننده مجموع زیان کیفی کل مشخصه های کیفی از نوع بزرگ تر بهتر می باشد و مطابق معادله (۱۳) تعریف می گردد:

$$Q_e^L = \sum_{L=1}^l K'_L [W_L (E(\underline{y}_S))^{-2} + (1 - W_L) Var(\underline{y}_L)] \quad (13)$$

ضریب W_L میزان ارجعیت انحراف معکوس مقدار مشخصه کیفی از نقطه صفر را نسبت به واریانس مشخصه کیفی L ام از نوع بزرگ تر بهتر نشان می دهد. K'_L ضریب ثابت زیان کیفی است و مجموع انحرافات را به مقیاس هزینه تبدیل می نماید. ضریب مذکور با در نظر گرفتن حدود مشخصات فنی مشتریان، مطابق معادله (۱۴) محاسبه می گردد.

$$K'_L = A_0 [(Lsl)_L]^2 , for L = 1, 2, \dots, l \quad (14)$$

عبارت A_0 در معادله (۱۴)، هزینه وارد شده به سیستم بابت خارج شدن مقدار مشخصه خروجی از حد پائین مشخصات فنی تعیین شده توسط مشتریان می باشد. شکل (۲) زیان کیفی مربوط به مشخصه های کیفی از نوع بزرگ تر بهتر را به صورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۳- تابع زیان کیفی برای مشخصه کیفی از نوع بزرگ تر بهتر.

۳-۴- زیان کیفی توسعه یافته برای مشخصه‌های کوچک‌تر بهتر

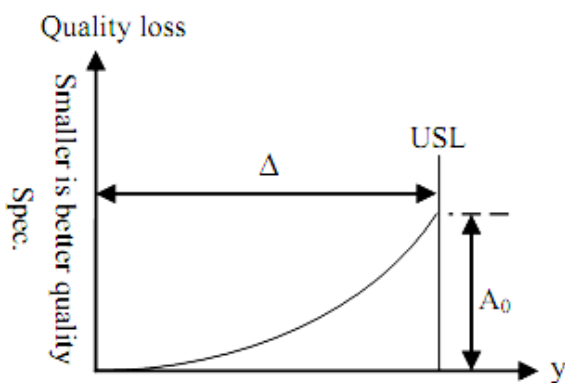
اگر $S = 1, 2, \dots, s$ نشان‌دهنده‌ی مشخصه‌های کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر فرآیند باشند آن‌گاه عبارت Q_e^S در معادله (۶) مشخص‌کننده مجموع زیان کیفی کل مشخصه‌های کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر می‌باشد و مطابق معادله‌ی (۱۵) تعریف می‌گردد.

$$Q_e^S = \sum_{S=1}^s K'_S [W_S (E(\underline{y}_S))^2 + (1 - W_S) \text{Var}(\underline{y}_S)] \quad (15)$$

ضریب W_S میزان ارجعیت انحراف مقدار مشخصه‌ی کیفی از نقطه‌ی صفر را نسبت به واریانس مشخصه‌ی کیفی S ام از نوع کوچک‌تر بهتر نشان می‌دهد. K'_S ضریب ثابت زیان کیفی است و مجموع انحراف مقدار مشخصه‌ی کیفی از نقطه‌ی صفر و واریانس را به مقیاس هزینه تبدیل می‌نماید. ضریب مذکور با در نظر گرفتن حدود مشخصات فنی مشتریان، مطابق معادله‌ی (۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$K'_S = A_0 [(USL)_S]^{-2}, \text{ for } S = 1, 2, \dots, s \quad (16)$$

عبارت A_0 در معادله‌ی (۱۶) هزینه‌ی وارد شده به سیستم بابت خارج شدن مقدار مشخصه‌ی خروجی از حد پائین مشخصات فنی تعیین شده توسط مشتریان می‌باشد. شکل (۳) زیان کیفی مربوط به مشخصه‌های کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳- تابع زیان کیفی برای مشخصه کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر.

۴- مثال عددی

در این قسمت، جهت نشان دادن کارایی و نحوه‌ی به‌کارگیری مدل در بهینه‌سازی فرآیند و انتخاب مقادیر بهینه‌ی فاکتورهای ورودی از یک مثال عددی استفاده گردیده است. مدل مذکور در نرم افزار لینگو کد نویسی گردیده و جواب بهینه ارائه گردیده است.

پارامترهای ورودی X_1 و X_2 به ترتیب با محدودیت حداقل ۱۲ و حداکثر ۲۰ و حداقل ۵ و حداکثر ۲۰ برای فرآیند مورد مطالعه فرض گردیده است. هم‌چنین مشخصه‌ی کیفی Y_1 از نوع بزرگ‌تر بهتر با هزینه‌ی اصلاحی ۱ واحد هزینه و حد پائین فنی به مقدار ۱۰۰ واحد و مشخصه‌ی کیفی Y_2 از نوع اسمی بهتر با هزینه‌ی اصلاحی ۵ واحد هزینه دارای حد پائین فنی به مقدار ۲۰ و حد بالای ۱۰۰ واحد می‌باشد. معادلات (۱۷) و (۱۸) رابطه‌ی بین مشخصه‌های کیفی Y_1 و Y_2 را با پارامترهای ورودی فرآیند نشان می‌دهد.

$$y_1(x_1, x_2) = -64.52x_1^2 + 0.42x_2^2 + 637.5x_1 - 3.85x_2 + 49.54x_1x_2 - 588.55 \quad (17)$$

$$y_2(x_1, x_2) = -0.51x_1^2 - 11.33x_2^2 + 6.44x_1 + 127.3x_2 + 28.62x_1x_2 - 2045 \quad (18)$$

رابطه‌ی بین هزینه‌ی تأمین خروجی با پارامترهای ورودی فرآیند به صورت معادله‌ی (۱۹) تعریف می‌گردد.

$$h(x_1, x_2) = 15.12x_1^2 + 13.51x_2^2 + 12.55x_1 + 10.34x_2 - 32.45x_1x_2 + 75.35 \quad (19)$$

به ازای $p=1,2$ و $i=1,2$ عبارتهای $E(y_1)$ و $E(y_2)$ با استفاده از معادله‌ی (۳) و عبارتهای $Var(y_1)$ و $Var(y_2)$ با استفاده از معادله‌ی (۴) محاسبه می‌گردند. معادله‌های زیر نشان‌دهنده‌ی واریانس پارامترهای ورودی و کواریانس بین پارامترهای مذکور می‌باشند.

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = Cov(x_1, x_2) = 9.35 \quad \sigma_{11} = Var(x_1) = 35 \quad \sigma_{22} = Var(x_2) = 2.5$$

ضرائب ثابت زیان کیفی برای مشخصه‌های کیفی اول و دوم و همچنین مقدار ایده‌آل برای مشخصه‌ی کیفی دوم از نوع اسمی بهتر به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$T_2 = 1/2(100 + 20) = 60 \quad K'_2 = 4 * 5(100 - 20)^{-2} = 0.003 \quad K'_1 = 1(100)^2 = 10,000$$

میزان ارجعیت انحراف از هدف نسبت به واریانس مشخصه‌ی کیفی برای هر دو مشخصه‌ی کیفی نسبت $0.3/0.7$ به $0.7/0.3$ در نظر گرفته می‌شود. معادله‌ی (۲۰) به عنوان تک تابع هدف غیرخطی مدل از نوع کمینه‌سازی و معادله‌های (۲۱) و (۲۲) به عنوان محدودیت‌های مدل در نظر گرفته می‌شوند.

$$Min (Tc) = 10,000 \left[0.3 \left(\frac{1}{E(y_1)^2} \right) + 0.7 Var(y_1) \right] + 0.003 [0.3 (E(y_2) - 650)^2 + 0.7 Var(y_2)] + h(x_1, x_2) \quad (20)$$

Subject to:

$$12 \leq X_1 \leq 20 \quad (21)$$

$$5 \leq X_2 \leq 20 \quad (22)$$

مدل فوق در نرم‌افزار لینگو کدنویسی گردیده و جواب بهینه جهت انتخاب مقادیر پارامترهای ورودی به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$X_1=12.00 \quad X_2=15.135 \quad Tc=5663476$$

مقادیر بهینه‌ی حاصل شده برای پارامترهای ورودی به نحوی است که فرآیند، کم‌ترین حساسیت را نسبت به متغیرهای مزاحم داشته و این نتایج با استفاده از آموزه‌های تاکوچی در زمینه‌ی طراحی اثرزدا و توسعه‌ی تابع زیان کیفی حاصل گردیده است. مقدار Tc حداقل مجموع هزینه‌ی تأمین و زیان کیفی مشخصه‌های کیفی است به نحوی که فرآیند بیش‌ترین خصوصیات اثرزدائی را داشته باشد. مدل کدنویسی شده مربوطه در بخش ضمانم ارائه گردیده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی فرآیند از نوع غیر خطی تک‌هدفه با در نظر گرفتن مفهوم تابع زیان کیفی در مباحث طراحی اثرزدا و توسعه‌ی تابع مذکور ارائه گردید. ایجاد ساختار مناسب جهت تبادل هزینه‌ی تأمین محصول (خروجی فرآیند) با زیان کیفی، بهینه‌سازی هم‌زمان کلیه‌ی مشخصه‌های کیفی محصول و از هر سه نوع مشخصه‌ی اسمی بهتر، کوچک‌تر بهتر و بزرگ‌تر بهتر، برآورد مناسب پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل با در نظر گرفتن اثرات متقابل دوگانه، در نظرگیری میزان ارجعیت انحراف از هدف و واریانس در هر مشخصه‌ی کیفی، وارد نمودن حدود مشخصات فنی مشتریان در مدل، وجود محدودیت‌های سیستمی و پیوسته بودن مقدار فاکتورهای ورودی، و هم‌مقیاس بودن کلیه‌ی جملات و عبارتهای تابع هدف از جمله نتایج و مزایای مدل ارائه شده در این پژوهش می‌باشد. توسعه و مقایسه‌ی مدل ارائه شده با مدل Lp متریک تابع زیان کیفی، استفاده از مفهوم تابع مطلوبیت در مدل‌سازی، ارائه جواب مدل به صورت یک بازه‌ی بهینه برای فاکتورهای ورودی به فرآیند، مقایسه و تحلیل نتایج در مدل‌سازی فرآیند با استفاده از تکنیک‌های دیگر موجود در طراحی اثرزدا از جمله نسبت‌های سیگنال به نویز (S/N) از مواردی است که می‌تواند در طراحی و انجام پژوهش‌های آتی مد نظر قرار گیرد.



خدایوندی، ع. (۱۳۸۱). مهندسی کیفیت با استفاده از طراحی اترزدا. همدان، انتشارات دانشگاه بو علی سینا.

بیوک آقازاده، پ. (۲۰۱۰). مشکل انتخاب پورتفولیو چند هدفه مقاوم. هفتمین کنفرانس مهندسی صنایع. اصفهان، ایران.

شاهین، آ؛ و پرنیانی فرد، ا. (۱۳۹۱). توسعه یک مدل بهینه سازی امتزاج با اهداف طراحی اترزدا. نهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

شهریاری، ح؛ و نباتچیان، م. ر. (۱۳۸۵). طراحی پارامترهای محصول با استفاده از مدلسازی ریاضی و مقایسه آن با روش تاگوچی. پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

فتاحی، پ؛ سعیدی مهرآباد، م؛ و حمیدی، م. (۱۳۸۴). ارائه یک مدل ترانس دهی قطعات بمنظور کاهش هزینه های تولید و زیان کیفیت. چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

قبادی، ش؛ نورالسنا، ر؛ و شیرازی، ب. (۱۳۸۵). طراحی آزمایشها در محیط فازی با استفاده از تصمیم گیری چند هدفه فازی. پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

تقی خانی، م؛ و علیجانی، م. (۱۳۸۹). استفاده از رویه پاسخ (RSM) در تخصیص بهینه ترانس. هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. اصفهان، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- Chandra, M. J. (2001). *Statistical quality control*. CRC Press.
- Beyer, H. G., & Sendhoff, B. (2007). Robust optimization—a comprehensive survey. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 196(33-34), 3190-3218.
- Chen, C. H. (2004). Robust design based on fuzzy optimization. *Tamsui oxford journal of mathematical sciences*, 20(1), 65-72.
- Diez, M., & Peri, D. (2010). Robust optimization for ship conceptual design. *Ocean engineering*, 37(11-12), 966-977.
- Kraslawski, A., Koiranen, T., & Nystrom, L. (1993). Concurrent engineering: robust design in fuzzy environment. *Computers & chemical engineering*, 17, S447-S452.
- Ardakani, M., Noorossana, R., Niaki, S. A., & Lahijanian, H. (2009). Robust parameter design using the weighted metric method—the case of ‘the smaller the better’. *International journal of applied mathematics and computer science*, 19(1), 59-68.
- Messac, A., & Ismail-Yahaya, A. (2002). Multiobjective robust design using physical programming. *Structural and multidisciplinary optimization*, 23(5), 357-371.
- Shahin, A. (2006). Robust design: an advanced quality engineering methodology for change management in the third millennium. *Proceedings of the 7th international conference of quality managers* (pp. 201-212).
- Sun, G., Li, G., Gong, Z., Cui, X., Yang, X., & Li, Q. (2010). Multiobjective robust optimization method for drawbead design in sheet metal forming. *Materials & design*, 31(4), 1917-1929.
- Parnianifard, A., Azfanizam, A. S., Ariffin, M. K. A., & Ismail, M. I. S. (2018). An overview on robust design hybrid metamodeling: Advanced methodology in process optimization under uncertainty. *International journal of industrial engineering computations*, 9(1), 1–32.
- Khoshnevisan, S., Wang, L., & Juang, C. H. (2017). Response surface-based robust geotechnical design of supported excavation—spreadsheet-based solution. *Georisk: assessment and management of risk for engineered systems and geohazards*, 11(1), 90-102.
- Dellino, G., & Meloni, C. (2015). *Uncertainty management in simulation- optimization of complex systems*. Springer.
- Moghaddam, S., & Mahlooji, M. (2016). Robust simulation optimization using ϕ -divergence. *International journal of industrial engineering computations*, 7(4), 517-534.
- Parnianifard, A., Azfanizam, A., Ariffin, M. K. A. M., Ismail, M. I. S., & Ale Ebrahim, N. (2018). Recent developments in metamodel based robust black-box simulation optimization: An overview. *Decision science letter*, 8(1), 17–44.

