نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

Journal of Decisions and Operational Research

دوره ۴، شماره (۱)، بهار ۱۳۹۸

طراحی یک مدل بهینه‌سازی اثرزدا بااستفاده 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 به‌صورت هم‌زمان میزان انحراف از مقدار هدف و واریانس مشخصه‌ی کیفی خروجی فرآیند را موردتوجه قرار می‌دهد. در شرایط واقعی بیش‌تر فرآیندها تحت تأثیر فاکتورها و عوامل خارجی و محیطی غیرقابل کنترل قرار داشته که باعث فاصله گرفتن مشخصه‌های کیفی فرآیند از نقاط ایده‌ال 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 موردتوجه قرار گرفته و اشاره گردیده است که تابع معرفی‌شده توسط تاگوچی در عین کارائی همانند بسیاری دیگر از تکنیک‌های معرفی‌شده در مهندسی کیفیت، دارای محدودیت‌هائی در مدل‌سازی فرآیند است که به‌جهت رفع این محدودیت‌ها، تابع زیان کیفی توسعه‌یافته معرفی و یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی به‌کمک تابع ذکرشده باهدف حداقل‌سازی اثرات متغیرهای مزاحم در فرآیند ارائه می‌گردد. در پایان، نحوه‌ی به‌کارگیری مدل معرفی‌شده جهت انتخاب بهینه مقدار پارامترهای ورودی در قالب یک مثال عددی نشان داده شده‌است.

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

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰ اصلاح: ۱۳۹۸/۱/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۸/۱/۲۴

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 نسبت‌به 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 تنهائی دارای محدودیت‌هایی است که هدف اصلی پژوهش، ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته می‌باشد که پوشش‌دهنده این محدودیت‌ها می‌باشد.

[۱] Robust design

[۲] Quality loss function

* عهده‌دار مکاتبات: parniani@hotmail.com

در بخش دوم این پژوهش این محدودیت‌ها مورداشاره قرار گرفته است. لازم‌به‌ذکر است این محدودیت‌ها مشترکا 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 متدلوژی برای برخورد با مسئله‌ی رقابت با دکتر جنیشی تاگوچی[1] که در آن زمان مهندس مسئول توسعه‌ی محصولات مخابراتی ویژه در آزمایشگاه‌های ارتباطات الکتریکی (ای.سی.ال)[2] بود، واگذار شد. وی به کمک تحقیقاتش در سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ اصول طراحی اثرزدا را توسعه داد و اساس کار خود را با به‌کاربستن نظریه‌هایش در توسعه‌ی محصولات مختلف اعتبار بخشید. دکتر تاگوچی با معرفی این روش، جایزه‌ی دمینگ 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[3] برای کسب اطلاعات مورد اعتماد، در مورد متغیرهای مربوطبه تصمیمات مهندسی، استفاده می‌کند. دانش طراحی آزمایش‌های آماری از کار رونالد فیشر[4] در سال ۱۹۲۰ در انگلستان سرچشمه می‌گیرد. فیشر اصول طراحی آزمایشی را پایه‌ریزی کرده و تکنیک تجزیه و تحلیل داده‌ها موسوم‌به تحلیل واریانس (آنووا)[5] را در تلاش برای بهبود فرآورده های کشاورزی ابداع کرد (خدایوندی، ۱۳۸۱). پس‌از آن استفاده از مباحث مربوطبه طراحی اثرزدا و کاربرد فراوان آن در کلیه‌ی صنایع روند چشمگیری داشته و هم اکنون در ایالات متحده، ژاپن و سایر کشورها به‌سرعت رشد کرده و انتظار می‌رود در دهه‌ی آینده این روش و کاربردهای آن رشد بیش‌تری از خود نشان دهند. در ادامه، برخی از پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه مورداشاره قرار می‌گیرد.

فتاحی و همکاران (۱۳۸٤) یک مدل تلرانس‌دهی به‌منظور 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 به‌کمک رویه‌ی سطح پاسخ در پژوهشی ارائه کردند. سان و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی بااستفاده از ساختار مدل بهینه‌سازی چندهدفه اثرزدا اقدام به طراحی پارامترها با درنظر 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 باهدف کاهش واریانس و ماکزیمم سازی بازگشت سرمایه را ارائه نموده‌است. 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 به‌همراه 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 (۲۰۰٦) در پژوهشی طراحی اثرزدا را به‌شکل 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 به‌وجود آورده است. چن (۲۰۰۴) مسئله طراحی اثرزدا در محیط فازی را مطرح کرده و از توصیف توابع عضویت خطی برای آرام‌سازی شرایط فرآیند نسبت‌به میانگین و واریانس استفاده نموده است. مساک و اسماعیل-یاهایا (۲۰۰۲) با کلاس‌بندی 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 به‌وسیله 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 به‌کمک مفاهیم طراحی اثرزدا ارائه نمودند. قبادی و همکاران (۱۳۸۵) به بررسی طراحی آزمایشات در محیط فازی پرداخته و متغیر پاسخ را به‌صورت یک عامل فازی (کیفی) در نظر گرفته‌اند. شهریاری و نباتچیان (۱۳۸٦) در پژوهشی یک مدلسازی ریاضی را برای یک مدل مونتاژ قطعات جهت طراحی پارامترهای

[1] Genechi Taguchi
[2] Electrical Communication Library (ECL)
[3] Design of Experiments (DOE)
[4] Ronald fisher
[5] Analysis of Variance (ANOVA)

نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۴، شماره (۱)، بهار ۱۳۹۸، صفحه: ۹-۱

تولید ارائه می‌کند و اینگونه بیان می‌کنند 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 مدل‌های بهینه‌سازی برمبنای طراحی اثرزدا در مطالعات مختلف و کاربردهای گوناگون موردتوجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. پرنیانی فرد و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به‌صورت مروری به بررسی آخرین کاربردها و توسعه‌ی طراحی اثرزدا در صنایع مختلف پرداخته‌اند. هم‌چنین در پژوهشی دیگر، پرنیانی فرد و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تلفیق طراحی اثرزدا با دیگر متد بهینه‌سازی ازجمله متامدل‌ها پرداخته‌اند. کاربرد طراحی اثرزدا برمبنای دیدگاه تاگوچی در مطالعات مختلف و تلفیق آن با روش‌های دیگر بهینه‌سازی ازجمله متامدل‌ها در پژوهش‌های مختلفی مورداستفاده قرار گرفته است ازجمله مقالات دلینو و مولینی (۲۰۱۵)، مقدم و مهلوجی (۲۰۱۶) و خوشنویسان و همکاران (۲۰۱۷).

تکنیک‌های معرفی‌شده در مباحث مهندسی کیفیت علاوه‌بر کارائی مناسب در کنترل و به‌سازی کیفیت در فرآیندهای مختلف دارای محدودیت و نواقصی می‌باشند که در این پژوهش، این محدودیت‌ها در طراحی ساختار مدل‌سازی مدنظر قرار می‌گیرد. در ذیل به تعدادی از این محدودیتها اشاره می‌گردد:

- *عدم درنظر گرفتن هزینه‌ی تأمین، تنظیم فاکتورها و ایجاد ساختار فرآیند بر روی سطحی خاص. به‌عنوان مثال در مفهوم طراحی اثرزدا به‌کمک طراحی آزمایشات و یا آرایه‌های متعامد، تنها هدف، تعیین سطوح بهینه‌ای از فاکتورهای ورودی فرآیند می‌باشد به‌نحوی که مشخصه‌ی کیفی خروجی فرآیند در نزدیک‌ترین مقدار به نقطه‌ی هدف و با حداقل واریانس قرار گیرد در صورتی که در بسیاری از فرآیندها هزینه‌ی تأمین و انتقال از یک سطح به سطح دیگر متفاوت می‌باشد. به‌عبارتی دیگر زیان کیفی (براساس آموزه‌های تاگوچی) با نزدیک شدن مقدار مشخصه‌ی کیفی خروجی به مقدار هدف کاهش می‌یابد درصورتی که هزینه‌ی تأمین (تولید) با نزدیک شدن مشخصه‌ی کیفی۱ به مقدار هدف افزایش می‌یابد. این هزینه شامل استفاده از دستگاه‌ها و تجهیزات پیچیده‌تر، مواد اولیه گران‌تر، نیروی انسانی با تخصص بیش‌تر و ... می‌باشد، لذا لازم است در مدل‌سازی فرآیند، تبادل مناسب بین هر دو هزینه مدنظر قرار گیرد.*
- *در بسیاری از تکنیکهای مهندسی کیفیت، تنها بهینه‌سازی یک مشخصه‌ی کیفی در هر بار اجرای تکنیک صورت می‌پذیرد که لازم است مدلی طراحی گردد که هم‌زمان بهینه‌سازی فرآیند را با درنظر گرفتن کلیه‌ی مشخصه‌های کیفی و برای هر سه نوع مشخصه‌ی کیفی از نوع اسمی بهتر[۲]، کوچک تر بهتر[۳] و بزرگ تر[۴] بهتر مدنظر قرار دهد.*
- *در بسیاری از مدل‌سازی فرآیندها، پارامترهای واردشده در مدل مجهول بوده و دارای برآورد مناسبی نمی‌باشند. به‌عنوان مثال، میانگین، نقطه‌ی هدف و واریانس مشخصه‌ی کیفی خروجی در تابع زیان کیفی تاگوچی پارامترهایی مهستند که نیاز است هم‌زمان با مدل‌سازی، روشی جهت برآورد مناسب این پارامترها با درنظر گرفتن شرایط فرآیند ازجمله روابط متقابل فاکتورهای ورودی ارائه گردد. دراین پژوهش وجود روابط متقابل دوگانه بین فاکتورهای ورودی مجاز می‌باشد و از روابط مرتبه‌های بالاتر صرف‌نظر می‌گردد.*
- *عدم ارجعیت و وجود وزن یکسان بین دو معیار میزان انحراف از نقطه‌ی هدف و واریانس مشخصه‌ی کیفی در تابع زیان کیفی تاگوچی از دیگر محدودیت‌های این تابع می‌باشد که باتوجه به شرایط حاکم بر فرآیند و مدل‌سازی نیاز است وزن و ارجعیت مناسب به‌این دو معیار اختصاص یابد.*
- *درنظر گرفتن حدود مشخصات فنی ارائه‌شده توسط مشتریان در مدل ،از دیگر مواردی است که لازم است در مدل‌سازی مدنظر قرار گیرد.*
- *لازم است وجود محدودیت‌های 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 آرایه‌های متعامد، تنها، سطوح گسسته‌ای از فاکتورهای ورودی را موردبررسی قرار می‌دهند درصورتی که مدل ارائه شده دراین روش، کلیه‌ی مقادیر مثبت را برای فاکتورهای ورودی به‌صورت پیوسته در نظر می‌گیرد.*

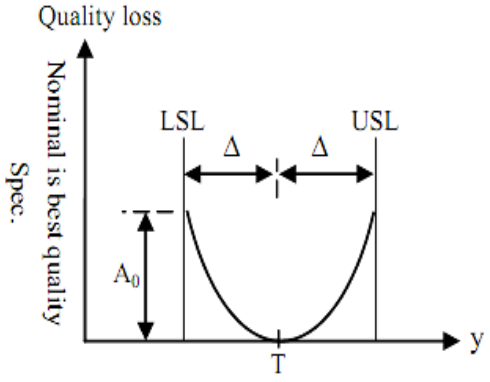
---

[۱] Quality Specification
[۲] Nominal is Best
[۳] Smaller is better
[۴] Larger is better

۲- تعریف مفاهیم به‌کاررفته در پژوهش

دکتر تاگوچی، زیان کیفی واردشده به فرآیند، ناشی از انحراف هر مشخصه‌ی کیفی نسبت‌به 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 به‌صورت شماتیک برای مشخصه‌های کیفی از نوع اسمی بهتر نشان می‌دهد.

$$Q = E[(y-t)^2] = [(y-t)^2 + \sigma^2] \qquad (۱)$$



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

اگر $x_i = x_1,x_2,x_3,\dots,x_n$ و $y_j = y_1,y_2,y_3,\dots,y_m$ به‌ترتیب نشان دهنده‌ی تعداد n پارامتر ورودی فرآیند و m مشخصه ی کیفی خروجی فرآیند باشند، وابستگی j امین مشخصه کیفی محصول (y_j) با پارامترهای کنترل ورودی (x_i) مطابق معادله زیر تعریف می‌گردد:

$$y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = \hat{\beta}_0^j + \sum_{i=1}^{n} \hat{\beta}_i^j x_i + \sum_{i=1}^{n} \hat{\beta}_{ii}^j x_i^2 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{p=1}^{n} \hat{\beta}_{ip}^j x_i x_p, \quad for\ j = 1,2,\dots,m \qquad (۲)$$

معادله(۲) رابطه‌ی بین مشخصه‌ی کیفی خروجی (متغیر پاسخ) و متغیرهای ورودی فرآیند را به‌صورت یک مدل چندجمله‌ای مرتبه‌ی دوم برآورد می‌نماید. دراین 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 توانائی زیادی برای نمایش حالت‌های مختلف توابع منحنی دارد و پارامترهای این مدل به‌راحتی 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). باتوجه به وجود روابط متقابل دوگانه در رابطه‌ی بین مشخصه‌ی کیفی و فاکتورهای ورودی فرآیند میانگین و واریانس مشخصه‌ی کیفی حاصل‌از تنظیم فاکتورهای ورودی در سطحی مشخص، از معادله‌های (۳) و (٤) محاسبه می‌گردد. روابط $E(\underline{y_j})$ و $Var(\underline{y_j})$ از بسط سری تیلور مرتبه‌ی دوم حاصل می‌گردد و از جملات با مرتبه‌ی سوم و بالاتر صرف‌نظر گردیده است.

$$E(\underline{y_j}) = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{p=1}^{n} \frac{\partial^2 f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i\, \partial x_p}\, \sigma_{ip} \qquad (۳)$$

$$Var(\underline{y_j}) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{p=1}^{n} \frac{\partial f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_p}\, \sigma_{ip} \qquad (٤)$$

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

$$\sigma_{ip} = Cov(x_i, x_p)\ \ if\ i \neq p \quad and \quad Var(x_i)\ if\ i = p \qquad (۵)$$

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

۳- تعریف مسأله

هدف از این پژوهش ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی فرآیند با درنظر گرفتن کلیه‌ی محدودیت‌ها و موارد مورداشاره در بخش (۲) پژوهش جاری و با تعریف تابع زیان کیفی توسعه‌یافته می‌باشد. مدل زیر شمای کلی مدل بهینه‌سازی مورداستفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

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

Subject to:

System's Constraint (۷)

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

معادله‌ی (٦) نشان‌دهنده تک تابع هدف غیرخطی مورداستفاده در مدل از نوع کمینه‌سازی می‌باشد (مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه غیرخطی از نوع کمینه‌سازی) و مجموع زیان‌های کیفی مشخصه‌های کیفی فرآیند و هزینه‌ی تأمین مشخصه‌ها را نشان می‌دهد. از خصوصیات تابع مذکور، هم مقیاس بودن کلیه‌ی عبارت‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن می‌باشد که همگی مشترکاً با مقیاس هزینه در مدل وارد می‌شوند. معادله‌ی (۷) نشان‌دهنده محدودیت‌های سیستمی در انتخاب سطوح بهینه‌ی فاکتورهای ورودی باتوجه به ماهیت و شرایط حاکم بر فرآیند می‌باشد. معادله‌ی (۸) به‌عنوان محدودیت در انتخاب مقادیر مثبت فاکتورهای ورودی لحاظ گردیده است. عبارت‌های Pc ،Q_e^S ،Q_e^L ،Q_e^G 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 موردبحث قرار می‌گیرند.

۳-۱- هزینه‌ی تأمین

عبارت Pc در معادله‌ی (٦) 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 غیرخطی 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 (٦) تابع زیان کیفی توسعه‌یافته برای کلیه‌ی مشخصه‌های کیفی از نوع اسمی بهتر در فرآیند می‌باشد و به‌صورت معادله (۱۰) تعریف می‌گردد.

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

عبارت T_G نشان‌دهنده‌ی نقطه‌ی بهینه درنظر گرفته شده برای مشخصه‌ی کیفی G ام و به‌کمک 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 بافرض 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 مشخصه کیفی G ام از نوع اسمی بهتر نشان می‌دهد. K'_G ضریب ثابت زیان کیفی است و مجموع انحرافات را به‌مقیاس هزینه تبدیل می‌نماید. ضریب مذکور با درنظر گرفتن حدود مشخصات فنی مشتریان، مطابق معادله‌ی (۱۲) محاسبه می‌گردد.

$$T_G = \frac{1}{2}[(USL)_G + (LSL)_G] \quad , for\ G = 1,2,\dots,g \tag{۱۱}$$

$$K'_G = 4A_0[(USL)_G - (LSL)_G]^{-2} \quad , for\ G = 1,2,\dots,g \tag{۱۲}$$

عبارت A_0 در معادله‌ی (۱۲) هزینه‌ی واردشده به سیستم بابت خارج شدن مقدار مشخصه‌ی خروجی از حدود مشخصات فنی مشتریان می‌باشد ازجمله هزینه‌های اصلاحی، دوباره‌کاری و ... . هم‌چنین فرض گردیده است که این هزینه برای خارج شدن از حد بالا برابربا خارج شدن از حد پائین فنی مشتریان می‌باشد (شکل ۱).

۳-۳- زیان کیفی توسعه‌یافته برای مشخصه‌های بزرگ‌تر بهتر

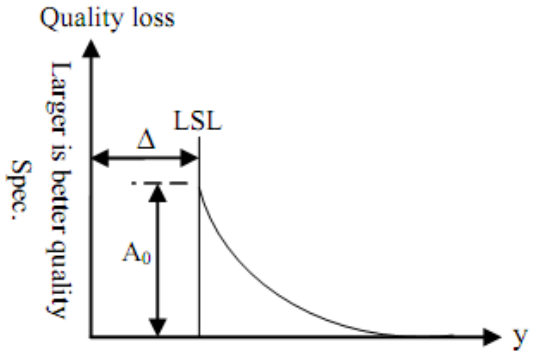
اگر L = 1,2,...,l نشان‌دهنده مشخصه‌های کیفی از نوع بزرگ‌تر بهتر فرآیند باشند آن‌گاه عبارت Q_e^L در معادله‌ی (٦) مشخص‌کننده مجموع زیان کیفی کل مشخصه‌های کیفی از نوع بزرگ‌تر بهتر می‌باشد و مطابق معادله‌ی (۱۳) تعریف می‌گردد:

$$Q_e^L = \sum_{L=1}^{l} K'_L \left[W_L (E(\underline{y_S}))^{-2} + (1 - W_L) Var\left(\underline{y_L}\right)\right]. \tag{۱۳}$$

ضریب W_L میزان ارجعیت انحراف معکوس مقدار مشخصه‌ی کیفی از نقطه‌ی صفر را نسبت‌به واریانس مشخصه‌ی کیفی L ام از نوع بزرگ‌تر بهتر نشان می‌دهد. K'_L ضریب ثابت زیان کیفی است و مجموع انحرافات را به‌مقیاس هزینه تبدیل می‌نماید. ضریب مذکور با درنظر گرفتن حدود مشخصات فنی مشتریان، مطابق معادله (١٤) محاسبه می‌گردد.

$$K'_L = A_0[(Lsl)_L]^2 \quad , for\ L = 1,2,\dots,l \tag{۱۴}$$

عبارت A_0 در معادله‌ی (١٤)، هزینه‌ی واردشده به سیستم بابت خارج شدن مقدار مشخصه‌ی خروجی از حد پائین مشخصات فنی تعیین‌شده توسط مشتریان می‌باشد. شکل(۲) زیان کیفی مربوط به مشخصه‌های کیفی از نوع بزرگ‌تر بهتر را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳- تابع زیان کیفی برای مشخصه‌ی کیفی از نوع بزرگ‌تر بهتر.

نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۴، شماره (۱)، بهار ۱۳۹۸، صفحه: ۹-۱

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

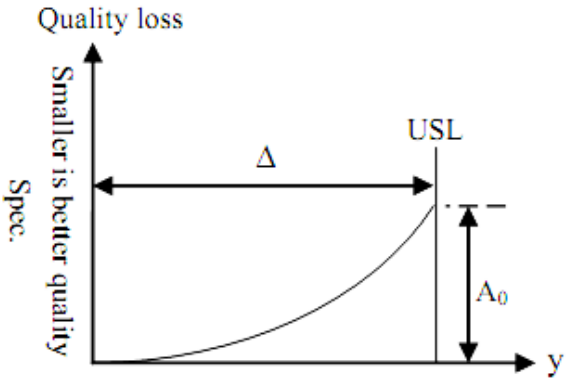
اگر S = 1,2,...,s نشان‌دهنده‌ی مشخصه‌های کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر فرآیند باشند آن‌گاه عبارت Q_e^S در معادله (٦) مشخص‌کننده مجموع زیان کیفی کل مشخصه‌های کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر می‌باشد و مطابق معادله‌ی (۱۵) تعریف می‌گردد.

$$Q_e^S = \sum_{S=1}^{s} K_S' \left[W_S(E(\underline{y_S})^2) + (1 - W_S)Var(\underline{y_S})\right] \qquad (۱۵)$$

ضریب W_S میزان ارجعیت انحراف مقدار مشخصه‌ی کیفی از نقطه‌ی صفر را نسبت‌به واریانس مشخصه‌ی کیفی Sام 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 به‌مقیاس هزینه تبدیل می‌نماید. ضریب مذکور با درنظر گرفتن حدود مشخصات فنی مشتریان، مطابق معادله‌ی (۱۶) محسبه می‌گردد.

$$K_S' = A_0[(USL)_S]^{-2} \quad , for\ S = 1,2,\dots,s \qquad (۱۶)$$

عبارت A_0 در معادله‌ی (١٦) هزینه‌ی واردشده به سیستم بابت خارج شدن مقدار مشخصه‌ی خروجی از حد پائین مشخصات فنی تعیین‌شده توسط مشتریان می‌باشد. شکل (۳) زیان کیفی مربوط به مشخصه‌های کیفی از نوع کوچک‌تر بهتر را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



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

۴- مثال عددی

در این قسمت، جهت نشان دادن کارائی 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 به‌ترتیب با محدودیت حداقل ۱۲ و حداکثر ۲۰ و حداقل ۵ و حداکثر ۲۰ برای فرآیند موردمطالعه فرض گردیده است. هم‌چنین مشخصه‌ی کیفی Y_1 ازنوع بزرگ‌تر بهتر با هزینه‌ی اصلاحی ۱ واحد هزینه و حد پائین فنی به‌مقدار ۱۰۰ واحد و مشخصه‌ی کیفی Y_2 ازنوع اسمی بهتر با هزینه‌ی اصلاحی ۵ واحد هزینه دارای حد پائین فنی به‌مقدار 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.

$$y_1(x_1, x_2) = -64.52x_1^2 + 0.42x_2^2 + 637.5x_1 - 3.85x_2 + 49.54x_1x_2 - 588.55 \qquad (۱۷)$$

$$y_2(x_1, x_2) = -0.51x_1^2 - 11.33x_2^2 + 6.44x_1 + 127.3x_2 + 28.62x_1x_2 - 2045 \qquad (۱۸)$$

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

$$h(x_1, x_2) = 15.12x_1^2 + 13.51x_2^2 + 12.55x_1 + 10.34x_2 - 32.45x_1x_2 + 75.35 \qquad (۱۹)$$

به ازای i=1,2 و p=1,2 عبارت‌های $E(\underline{y_1})$ و $E(\underline{y_2})$ با استفاده از معادله‌ی (۳) و عبارت‌های $Var(\underline{y_1})$ و $Var(\underline{y_2})$ بااستفاده از معادله‌ی (٤) محاسبه می‌گردند. معادله‌های زیر نشان‌دهنده‌ی واریانس پارامترهای ورودی و کواریانس بین پارامترهای مذکور می‌باشند.

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

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

$$T_2 = 1/2(100 + 20) = 60 \qquad K_2' = 4 * 5(100 - 20)^{-2} = 0.003 \qquad K_1' = 1(100)^2 = 10{,}000$$

میزان ارجعیت انحراف از هدف نسبت‌به واریانس مشخصه‌ی کیفی برای هر دو مشخصه‌ی کیفی نسبت ۰/۳ به ۰/۷ درنظر گرفته می‌شود. معادله‌ی (۲۰) به‌عنوان تک تابع هدف غیرخطی مدل از نوع کمینه‌سازی و معادله‌های (۲۱) و (۲۲) به‌عنوان محدودیت‌های مدل درنظر گرفته می‌شوند.

$$Min\ (Tc) = 10{,}000[0.3\left(\frac{1}{E(\underline{y_1})^{\,2}}\right) + 0.7Var(\underline{y_1})] + 0.003[0.3\ (E(\underline{y_2})\ - 650)^2 + 0.7Var(\underline{y_2})]\ + h(x_1, x_2) \qquad (۲۰)$$

Subject to:

$$12 \le X_1 \le 20 \qquad (۲۱)$$

$$5 \le X_2 \le 20 \qquad (۲۲)$$

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

X_1=12.00 X_2=15.135 Tc=5663476

مقادیر بهینه‌ی حاصل‌شده برای پارامترهای ورودی به‌نحوی است که فرآیند، کم‌ترین حساسیت را نسبت‌به متغیرهای مزاحم[1] داشته و این نتایج بااستفاده از آموزه‌های تاگوچی در زمینه‌ی طراحی اثرزدا و توسعه‌ی تابع زیان کیفی حاصل گردیده است. مقدار Tc حداقل مجموع هزینه‌ی تأمین و زیان کیفی مشخصه‌های کیفی است به‌نحوی که فرآیند بیش‌ترین خصوصیات اثرزدائی را داشته باشد. مدل کدنویسی‌شده مربوطه در بخش ضمائم ارائه گردیده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی فرآیند از نوع غیر خطی تک‌هدفه با درنظر 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 سه‌نوع مشخصه‌ی اسمی بهتر، کوچک‌تر بهتر و بزرگ‌تر بهتر، برآورد مناسب پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل با در نظر گرفتن اثرات متقابل دوگانه، درنظرگیری 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 ازجمله نتایج و مزایای مدل ارائه شده در این پژوهش می‌باشد. توسعه و مقایسه‌ی مدل ارائه‌شده با مدل Lp متریک تابع زیان کیفی، استفاده از مفهوم تابع مطلوبیت در مدل‌سازی، ارائه جواب مدل به‌صورت 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.

[1] Noise factors

نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۴، شماره (۱)، بهار ۱۳۹۸، صفحه: ۹-۱

منابع

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

بیوک‌آقازاده، پ. (۲۰۱۰). مشگل انتخاب پورتفویلو چند هدفه مقاوم. هفتمین کنفرانس مهندسی صنایع. اصفهان، ایران.

شاهین، آ؛ و پرنیاني فرد، ا.(۱۳۹۱). توسعه يك مدل بهينه سازي امتزاج با اهداف طراحي اثرزدا. 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.

فتاحي، پ؛ سعيدي مهرآباد، م؛ و حميدي، م. (۱۳۸۴). ارائه يك مدل تلرانس دهي قطعات بمنظور كاهش هزينه هاي توليد و زيان كيفيت. چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

قبادی، ش؛ نورالسناء، 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.

نقي خاني، م؛ و عليجاني، م. (۱۳۸۹). استفاده از رويه پاسخ (RSM) در تخصيص بهينه تلرانس. 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.