Archive of SID

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۱-۳۵، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۲۹-۱۳۷، (یادداشت فنی)

Research Note

ارائه‌ی یک مدل ترکیبی بر پایه‌ی برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی و روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی مشخصه‌های کیفیت با در نظر گرفتن استواری

طه حسین حجازی * **(استادیار)**
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پردیس گرمسار)
زکیه پارسایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
گروه مدیریت صنعتی، موسسه آموزش عالی بینالود

در دنیای امروز کیفیت یک راهبرد تجاری برای افزایش سهم بازار است و عدم دست‌یابی به این مهم به مشکلاتی چون عدم رضایت مشتری و در نتیجه کاهش سهم بازار و حذف از دنیای رقابت منجر می‌شود. از این رو، امروزه مباحث مربوط به مهندسی کیفیت در صنعت از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این زمینه روش‌های مختلفی ارائه شده است که یکی از آنها روش سطح پاسخ است؛ هنگامی که رابطه‌ی بین متغیرهای یک فرایند مشخص نباشد و آزمایشگر علاقه‌مند به یافتن تنظیمات بهینه‌ی متغیرهای ورودی باشد، از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش سطح پاسخ با رویکرد طراحی استوار برای بهینه‌سازی مشخصه‌های کیفیت محصول و متغیرهای تأثیرگذار بر روی آنها استفاده شده است؛ به گونه‌یی که در ابتدا باید به شناسایی متغیرهای کنترلی و متغیرهای پاسخ پرداخت؛ سپس با انجام طراحی آزمایش و به دست آوردن معادلات رگرسیون مورد نظر به بهینه‌سازی مدل پرداخت.

واژگان کلیدی: طراحی آزمایش‌ها، روش سطح پاسخ، برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی، طراحی استوار پارامتر.

t.h.hejazi@aut.ac.ir
parsaei.z68@gmail.com

۱. مقدمه

در بازار رقابتی امروز، شرکت‌ها باید توسط تولید محصولاتی متمایز شوند که علاوه بر فراهم آوردن سود، کیفیت مطلوب را نیز برآورده سازند. مشخصه‌های مربوط به کیفیت یک محصول عموماً از طریق متغیرهایی بیان می‌شود که به آنها متغیرهای پاسخ[۱] (خروجی) می‌گویند. از آن‌جایی که متغیرهای پاسخ تحت تأثیر یک یا چند متغیر مستقل قرار دارند، یافتن رابطه‌ی موجود میان متغیرها و بهینه‌سازی هم‌زمان این مشخصه‌ها حائز اهمیت است. از طرفی عمر مفید یک محصول یا یک سامانه نیز رابطه‌ی مستقیمی با کیفیت آن محصول و سامانه دارد؛ واضح است در چنین مواقعی مقدار میانگین به تنهایی نمی‌تواند مشخص‌کننده‌ی سطحی از کیفیت یک مشخصه در نظر گرفته شود؛ به همین دلیل در حوزه‌ی مربوط به کیفیت، تغییرپذیری یک مشخصه نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا به کاهش این تغییرپذیری در حد امکان پرداخته شود که این رویکرد مفهوم پایه‌یی طراحی استوار را به وجود می‌آورد. طراحی استوار روشی مهندسی است برای بهینه‌سازی شرایط یک محصول یا فرایند به نحوی که حداقل حساسیت را نسبت به عوامل ایجاد تغییر از خود نشان دهد و در نهایت محصولاتی با کیفیت مطلوب و هزینه‌ی تولید پایین عرضه کند. همچنین در دنیای واقعی بیشتر مسائل از جنس مسائل چندپاسخی است به این معنی که برای رسیدن به سطح مطلوبی از کیفیت به بهینه‌سازی و کنترل چندین متغیر خروجی (پاسخ) به صورت هم‌زمان نیاز است. روش‌های آماری متعددی برای بهبود فرایندهای تولید مطرح شده است که یکی از مهم‌ترین آنها، روش طراحی آزمایش‌ها (DOE)[۲] است. طراحی آزمایش‌ها به طور کلی دنباله‌یی از آزمون‌هاست که در آن با تغییراتی هدفمند در متغیرهای ورودی یک فرایند یا سامانه بتوان دلایل تغییراتی را که در متغیرهای پاسخ به وجود می‌آیند، تشخیص داد.[۱] یکی از مفاهیم طراحی آزمایش‌ها روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM)[۳] است که مجموعه‌یی از روش‌های ریاضی و آماری برای مدل کردن و تحلیل مسائلی است که یک متغیر پاسخ به وسیله چندین متغیر تأثیر می‌پذیرد و هدف بهینه کردن این متغیر پاسخ است.[۲] در یک تعبیر ریاضی، هدف پیدا کردن شرایط عملیاتی یا سطوح عامل $(X_1, X_2, ..., X_K)$ است که r متغیر پاسخ $(Y_1, Y_2, ...Y_r)$ بسته به نوع مسئله کمینه یا بیشینه می‌شود. در این میان در اغلب مدل‌های نظیر مسائل واقعی، درصدی از عدم قطعیت در پارامترهای مدل

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۷/۷/۲۸، پذیرش ۱۳۹۷/۸/۱۳.
DOI:10.24200/J65.2018.7304.1798

www.SID.ir

Archive of SID

وجود دارد که در نظرگرفتن آنها موجب تفاوت معنی‌داری می‌شود. اگرچه مدل‌های قطعی زیادی با هزاران متغیر و محدودیت در صنعت وجود دارند، ولی جواب تولیدی این مدل‌ها غالباً به علت این که احتمالات آتی را در نظر نمی‌گیرند، توسط مدیران به کار گرفته نمی‌شود. یک پارامتر غیرقطعی ممکن است بر متغیرهای مختلفی اثر بگذارد در نتیجه در نظرگرفتن تصادفی بودن پارامترها مهم است و باید به طریقی در تصمیم‌گیری لحاظ شود. تحقیق در عملیات بر تصمیم‌گیری استوار است و در شرایطی که نمی‌توان از نقش عدم قطعیت صرف نظر کرد، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود.[۳]

این مسائل به صورت برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه فرمول‌بندی می‌شوند که برای حل آنها روش‌های مختلفی ارائه شده است. در این پژوهش روش برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی به کار برده شده است که در بخش بعد به طور مختصر توضیح داده خواهد شد.

۲. مرور پیشینه

طراحی استوار یک روش مهندسی است که باعث کاهش هزینه‌ها و نیز بهبود کیفیت محصول و فرایند می‌شود. در طراحی استوار معمولاً فرض بر این است که در یک فرایند و آزمایش عوامل قابل کنترل و نیز عوامل غیرقابل کنترل یا عواملی که به سختی قابل کنترل هستند، وجود دارند؛ این دو گروه از متغیرها هر دو بر روی مشخصه‌های کیفیت یک محصول تأثیرگذار خواهند بود. هدف طراحی استوار انتخاب سطوح بهینه‌یی از متغیرهای قابل کنترل است به گونه‌یی که تغییرپذیری ناشی از وجود متغیرهای غیرقابل کنترل (مزاحم یا نویز)[۴] در آزمایش را تا حد امکان کمینه کند. طراحی استوار اولین بار در اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰ توسط یک مشاور کیفیت ژاپنی به نام تاگوچی مطرح شد.[۲]

در مرور تاریخچه طراحی استوار دو رویکرد اصلی وجود دارد که در ادامه به اختصار به مرور این دو رویکرد پرداخته می‌شود.

۱.۲. رویکرد تاگوچی در طراحی استوار

متغیرهای قابل کنترل که معمولاً آنها را با X نمایش می‌دهند، به راحتی قابل‌کنترل هستند؛ اما متغیرهای غیرقابل کنترل (نویز) را که معمولاً آنها را با Z نمایش می‌دهند، به سختی یا با صرف هزینه‌های زیاد می‌توان کنترل کرد. به همین دلیل به آنها غیرقابل کنترل می‌گویند. طراحی استوار پارامترها، شامل انتخاب سطح بهینه‌یی از متغیرهای قابل کنترل است تا سامانه یا محصول مورد نظر بتواند به مقدار هدف بهینه‌ی خود دست یابد؛ چالش در این گونه مسائل رسیدن به خروجی مورد انتظار است. زیرا به دلیل وجود متغیرهای غیرقابل کنترل دست‌یابی به خروجی مورد نظر دشوار است.

رویکرد تاگوچی را می‌توان به دو حالت زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف) تابع زیان تاگوچی

تاگوچی ایده‌ی خود را در مورد تابع زیان این گونه بیان می‌کند که هرگونه انحراف از مقدار هدف زیانی را به سامانه تحمیل می‌کند و این زیان با فاصله از مقدار هدف دارای رابطه‌یی از توان ۲ است. تعداد محدودی تابع زیان برای ارزیابی یک فرایند وجود دارد که از بین آنها تابع زیان مربعات خطا[۵] از اهمیت به سزایی برخوردار است و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$L(Y,t) = (Y-t)^2 \qquad (۱)$$

که Y در این معادله نشان‌دهنده‌ی متغیر پاسخ فرایند (خروجی) و t نیز مقدار هدف مورد انتظار برای رسیدن متغیر پاسخ به آن است و هرگونه انحراف از مقدار هدف منجر به زیان می‌شود که این زیان با فاصله از مقدار هدف دارای رابطه‌یی از توان دو است.

ب) روش دومرحله‌یی تاگوچی

یکی از بدیع‌ترین ایده‌های تاگوچی استفاده از مقیاس اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز[۶] برای اندازه‌گیری کیفیت محصول و فرایند است. تاگوچی بر پایه‌ی روش سیگنال به نویز توانست مفهوم جدیدی به نام استواری را ارائه دهد که قادر است محصولی را طراحی کند که کمترین تغییرپذیری را نسبت به متغیرهای غیرقابل کنترل (نویز) داشته باشد. حال به توضیح و مرور این روش می‌پردازیم.

اگر Y را یک متغیر وابسته نسبت به متغیرهای قابل کنترل و متغیرهای مزاحم (نویز) در نظر بگیریم، آنگاه خواهیم داشت:

$$Y = f(x, N, \theta) + \varepsilon \qquad (۲)$$

که $x = (x_1, ..., x_p)^T$ نشان‌دهنده‌ی بردار متغیرهای قابل کنترل و $N = (N_1, ..., N_q)^T$ بیان‌گر بردار متغیرهای مزاحم است. θ نیز بردار پاسخ‌های ناشناخته از پارامترهای مدل است. عوامل قابل کنترل را می‌توان به عنوان متغیرهای ثابت و عوامل غیرقابل کنترل را می‌توان به عنوان متغیرهای تصادفی و عامل ایجاد تغییرپذیری در فرایند و محصول در نظرگرفت. ε نیز در این مدل نشان‌گر آن میزان از تغییرپذیری است که توسط متغیرهای غیرقابل کنترل نیز قابل تعریف نیست و بنا بر دلایل دیگر ایجاد می‌شود.

۲.۲. رویکرد سطح پاسخ در طراحی استوار

روش سطح پاسخ مجموعه‌یی از روش‌های آماری و ریاضیاتی است که کاربرد آن برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی است که یک متغیر پاسخ (خروجی) مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر مستقل دیگر قرار داشته باشد و ما بخواهیم این متغیر پاسخ را به مقدار بهینه‌ی خود برسانیم.[۵] شکل عمومی یک سطح پاسخ برای مدل‌های درجه دوم (و اول) به صورت زیر است.

$$y = \sum_{i=1}^{p} \beta_i x_i + \sum_{j=1}^{p} \sum_{i=1}^{p} .i < j \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{p} \beta_{ii} x_{ii}^2 \qquad (۳)$$

در دهه‌ی ۱۹۹۰ دو رویکرد از RSM برای طراحی استوار مطرح شد:

الف) رویکرد سطح پاسخ دوگانه[۷]: در این رویکرد مدل RSM به دو مدل مجزا، یک مدل برای میانگین و یک مدل برای مدل‌سازی سطح پاسخ واریانس، تقسیم می‌شود؛ که اصطلاحاً به این دو مدل، مدل اثرهای مکانی[۸] و پراکندگی[۹] نیز می‌گویند.

ب) رویکرد تک‌پاسخی[۱۰]: در این رویکرد متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل به صورت هم‌زمان در یک مدل کنار هم قرار می‌گیرند. در این مدل باز هم دو معادله‌ی سطح پاسخ (یکی برای میانگین و یکی برای واریانس) وجود دارد؛ اما مدل واریانس به صورت نظری از مدل سطح پاسخ میانگین تخمین زده می‌شود.

در ادامه برخی از پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام شده است، معرفی می‌شود: ریبیرو و همکاران[۶] یک رویکرد بهینه‌سازی مستقل با ترکیب تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش سطح پاسخ ارائه کردند. پال و گوری[۷] اثربخشی پنج شاخص عملکردی را که برای بهینه‌سازی مسائل چندپاسخه استفاده می‌شوند، امتحان کردند. آنها مشاهده کردند که نسبت سیگنال به نویز وزن‌دار بر پایه‌ی رگرسیون چندگانه به عنوان شاخص

www.SID.ir

Archive of SID

عملکرد بیشترین کارایی را در پیدا کردن جواب بهینه برای مسائل چندپاسخه دارد. وانگ و همکاران[۸] طراحی پارامتر استوار را برای سامانه‌های چندپاسخه‌ی پویا استفاده کردند؛ در این پژوهش مشخص شد که ترکیب سطح عامل بهینه‌ی به دست آمده توسط روش طراحی استوار نزدیک‌ترین راه حل ایده‌آل و در فاصله‌ی دورتری از راه حل ایده‌آل منفی است. رمضانی و همکاران[۹] یک رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی ـ تاپسیس را برای بهینه‌سازی چندپاسخه پیشنهاد کردند. در این روش مفاهیم جواب‌های غیرمسلط و فاصله‌های پیش‌بینی مورد استفاده قرارگرفته است. چن و یه[۱۰] با توجه به ساختار سلسله‌مراتبی ذاتی از مشکلات پاسخ دوگانه، یک رویکرد سلسله‌مراتبی بیزی برای مدل سطوح پاسخ دوگانه ارائه دادند. چنین رویکردی با روش حداقل مربعات با استفاده از دو مجموعه داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی مقایسه شده است. بیلان و رائی‌چو[۱۱] از طراحی پارامتر استوار در فرایندهای تولیدی با تغییرات بالا استفاده کردند و یک روش جایگزین برای کاهش منابع تغییرات پیشنهاد دادند و به طور خاص، با استفاده از ضریب تغییرات منابع نفوذپذیری بین نقاط طراحی را شناسایی کردند و پس از بین بردن این منابع با استفاده از نظریه‌ی طراحی بهینه به توازن چارچوب تجربی پرداختند. دینگ و همکاران[۱۲] بهینه‌سازی سطوح پاسخ دوگانه را انجام دادند؛ آنها از رویکرد میانگین مربع خطای وزنی استفاده کردند و نشان دادند که این رویکرد، روش بهینه‌سازی را بهبود می‌دهد. هانگ و همکاران[۱۳] مدل سطح پاسخ دوگانه را بر اساس روش بهینه‌سازی استواری چندهدفه برای مقابله با عدم قطعیت در نوعی لوله خاص ارائه دادند. تی‌سای و لیک‌کنن[۱۴] طراحی استوار پارامترها را برای فرایند چاپ استنسیل میکرو BGA با استفاده از روش فازی مبتنی بر منطق تاگوچی انجام دادند و بهینه‌سازی با روش تاگوچی و همچنین روش ترکیبی الگوریتم شبکه‌های عصبی و ژنتیک با هم مقایسه شدند و این نتیجه حاصل شد که روش تاگوچی مبتنی بر منطق فازی پیشنهادی بهتر از دو روش دیگر ارائه می‌دهد.

۳. روش پیشنهادی

در این بخش روش برنامه‌ریزی آرمانی و برنامه‌ریزی تصادفی به طور مختصر توضیح داده می‌شود.

برنامه‌ریزی آرمانی[۱۱] یکی از مهم‌ترین مدل‌های برنامه‌ریزی در حوزه‌ی تصمیم‌گیری چندهدفه[۱۲] است. این مدل یک رویکرد تحلیلی مهم برای مسائل تصمیم‌گیری در حالتی است که اهداف به تمام مشخصه‌ها تخصیص داده شده‌اند و تصمیم‌گیرندگان علاقه دارند تا احتمال عدم تحقق اهداف مورد نظر را کمینه کنند. این مدل اجازه می‌دهد تا درحالی که تصمیم‌گیرندگان در جستجوی بهترین جواب از بین مجموعه‌یی از جواب‌های شدنی‌اند، بسیاری از اهداف به طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند.

برنامه‌ریزی تصادفی، روشی است که به مدل‌سازی آن دسته از مسائل بهینه‌سازی می‌پردازد که در آنها برخی از داده‌های مسئله، غیرقطعی فرض می‌شوند. این روش، در مقایسه با روش تک سناریوی قطعی معمولاً جواب‌های واقعی‌تری تولید می‌کند و به طور مستقیم کمبودهای مدل‌های قطعی را پوشش می‌دهد. یکی از رایج‌ترین و مشهورترین مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی است. مهم‌ترین ویژگی این مدل‌ها، تقسیم تصمیمات به دوگروه یا مرحله است که تصمیم‌گیرنده در مرحله‌ی اول تصمیمی را اتخاذ می‌کند (تصمیمات مرحله‌ی اول)، سپس یک واقعه‌ی تصادفی اتفاق می‌افتد که بر عملکرد تصمیمات مرحله‌ی اول تأثیر می‌گذارد. آنگاه یک تصمیم بازگشتی (تصمیمات مرحله‌ی دوم) اتخاذ می‌شود که سعی می‌کند تأثیرات نامطلوب احتمالی تصمیمات مرحله‌ی اول را جبران کند. علت این‌که آن را مسئله‌ی برنامه‌ریزی دومرحله‌یی می‌نامیم، این است که لزوماً نیاز نیست تصمیمات مرحله‌ی اول و دوم را در یک زمان اتخاذ کنیم؛ بلکه می‌توانیم تصمیمات مرحله‌ی دوم را تا پس از وقوع یک رویداد و رفع عدم قطعیت، به تعویق بیندازیم.

۴. رویکرد پیشنهادی

در این مقاله یک مدل ترکیبی بر پایه‌ی برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی و روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی مشخصه‌های کیفیت با در نظرگرفتن استواری ارائه شده است. این روش شامل ۷ مرحله به شرح زیر است:

۱. تعیین متغیرها: در این مرحله مشخصه‌های کیفیت، عوامل و متغیرهای پاسخی که در فرایند شرکت دارند، شناسایی می‌شوند. در این مقاله عوامل قابل کنترل به صورت $X = (X_1, X_2, ..., X_n)$ و متغیرهای پاسخ به صورت $R = (R_1, R_2, ..., R_p)$ نشان داده می‌شوند.

۲. طراحی آزمایش‌ها: در این مرحله طبق تعداد عوامل و متغیرهای پاسخ، طرح مناسب از بین طرح‌های موجود انتخاب می‌شود و آزمایش صورت می‌پذیرد.

۳. مدل‌سازی: کشف رابطه‌ی موجود میان متغیرها و تخمین معادله‌ی رگرسیون آنها.

۴. طراحی مدل بر اساس برنامه‌ریزی آرمانی: معادلات به دست آمده به شکل معادلات برنامه‌ریزی آرمانی نوشته می‌شود.

$$Min \sum_{k=1}^{p} W_k(d_k + d'_k)$$

$$s.t:$$

$$\hat{R}_K + d_k - d'_k = T_k \qquad \forall k = 1, 2, ..., p \qquad (۴)$$

$$\hat{R}_K + d_k = T_k \qquad \forall k = 1, 2, , ..., p \qquad (۵)$$

$$\hat{R}_K + d'_k = T_k \qquad \forall k = 1, 2, , ..., p$$

$$L < x < U \qquad (۶)$$

W_k در تابع هدف نشان‌دهنده‌ی اهمیت متغیر پاسخ و $\sum W_k = 1$ است.

رابطه ۴ برای زمانی استفاده می‌شود که هم بیشتر و هم کمتر محقق نامطلوب تلقی شوند؛ به عبارتی مقدار اسمی بهترین است (NTB) [13] در این نوع متغیر پاسخ، مقداری به عنوان هدف از پیش تعیین می‌شود.

رابطه‌ی ۵ برای زمانی است که بیشتر محقق نامطلوب تلقی شود؛ در این نوع متغیر پاسخ، هرچه مقدار متغیر پاسخ کمتر باشد، بهتر است (STB) [14]. این حالت معمولاً حد بالا برای متغیر پاسخ قرار می‌دهد و مقادیر بزرگ‌تر از آن قابل قبول نیست.

و رابطه‌ی ۶ برای زمانی است که کمتر محقق نامطلوب تلقی شود؛ در این نوع متغیر پاسخ، هر چه مقدار متغیر پاسخ بزرگ‌تر باشد بهتر است (LTB) [15]، در این حالت معمولاً حد پایین برای متغیر پاسخ در نظرگرفته می‌شود و مقادیر کمتر از آن قابل قبول نیست.[۱۵]

۵. برنامه‌ریزی تصادفی: در این مرحله در ابتدا بر اساس میانگین و واریانس ضرایب متغیرها، اعداد تصادفی به دست می‌آید و سپس با توجه به تعداد اعداد تصادفی ایجاد شده برای ضرایب معادلات رگرسیون سناریوهای مختلفی بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی نوشته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۶. کاهش سناریو: به علت زمان حل بسیار بالای مدل توسط نرم‌افزارهای بهینه‌سازی از ماتریس واریانس ـ کوواریانس استفاده می‌شود و روش به دست آوردن ماتریس واریانس ـ کوواریانس به شرح زیر است:

برآوردهای کمترین مربعات ضرایب رگرسیون چندگانه به صورت زیر است:[۱۶]

$$B = (X'X)^{-1}X'Y$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \widehat{\beta_0} \\ \widehat{\beta_1} \\ . \\ . \\ . \\ \widehat{\beta_K} \end{pmatrix} \qquad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ . \\ . \\ . \\ y_n \end{pmatrix} \qquad (۷)$$

X یک ماتریس $n \times (k+1)$ اساساً مرکب از مقادیر مفروض xها، به انضمام ستون ۱ هاست تا جملات ثابت نیز منظور شوند. Y یک ماتریس $n \times 1$ مرکب از مقدارهای مشاهده شده yهاست و B یک ماتریس $k \times 1$ مرکب از برآوردهای کمترین مربعات ضرایب رگرسیون است.

و مطابق فرمول ذکر شده X' ترانهاده X و $(X'X)^{-1}$ معکوس $X'X$ است. $\widehat{\beta_t}$ها ترکیب‌هایی خطی از n متغیر تصادفی مستقل Y_i هستند، به طوری که خود $\widehat{\beta_t}$ها دارای توزیع نرمال هستند. به علاوه آنها برآوردگرهایی ناارب‌اند، یعنی:

$$E(\widehat{B_1}) = \beta_i \qquad i = 0, 1, 2, ..., k \qquad (۸)$$

و واریانس‌های آنها عبارت‌اند از:

$$Var(\widehat{B_l}) = c_{ii}\sigma^2 \qquad i = 0, 1, 2, ..., k \qquad (۹)$$

در این‌جا c_{ii} درایه‌ی سطر iام و ستون jام ماتریس $(X'X)^{-1}$ است که در آن i و j مقادیر $k, ..., 1, 0$ را اختیار می‌کنند.

به صورت کلی برای کل ماتریس رابطه‌ی زیر برقرار است:[۱۶]

$$Var(\widehat{B_t}) = (X'X)^{-1}\sigma^2 \qquad (۱۰)$$

به علت زمان‌بر بودن حل تمام حالات حاصل توسط نرم‌افزارهای حل مدل‌های تحقیق در عملیات بهینه‌سازی، از ماتریس واریانس ـ کوواریانس استفاده می‌شود که مطابق رابطه‌ی فوق است.

با توجه به این فرمول ماتریس X با استفاده نرم‌افزار Minitab به دست می‌آید و رابطه‌ی بین هر ضریب با سایر ضرایب را مشخص می‌کند و با توجه به فرمول مقدار σ نیز معرف انحراف معیار هر متغیر پاسخ است و توسط نرم‌افزار Minitab مشخص می‌شود و پس از انجام عملیات ریاضی ماتریس واریانس ـ کوواریانس برای هر متغیر پاسخ حاصل می‌شود. سپس با استفاده از ماتریس واریانس ـ کوواریانس و میانگین ضرایب هر متغیر پاسخ داده‌های تصادفی ایجاد می‌شود.

۷. بهینه‌سازی مدل: بر اساس مدل ایجاد شده و حل آن در نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مقادیر بهینه‌ی متغیرهای کنترلی به دست می‌آید.

۵. مثال موردی

در این قسمت روش‌شناسی پیشنهادی با یک مثال موردی توضیح داده و بررسی می‌شود؛ این پژوهش بر روی فرایند تولید نبات صنعتی انجام شده است.

دو متغیر کنترلی داریم:

- بریکس شیره‌ی خروجی (X_1):مقدار ماده خشک موجود در محلول را بریکس می‌نامند. در این پژوهش مقدار شکر موجود در شیره به عنوان بریکس شناخته می‌شود.
- دمای گرم‌خانه هنگام تخلیه‌ی شیره (X_2).

و متغیرهای پاسخ شامل موارد زیر است:

- میزان خروجی نبات (R_1): اصلی‌ترین هدف هر واحد صنعتی افزایش تولید و در نتیجه کاهش هزینه‌های سربار است که این مهم با افزایش تولید انجام پذیر است و دو متغیر کنترلی در این مقاله تأثیر به سزایی بر روی خروجی نبات دارند؛
- زمان نگهداری در گرم‌خانه(R_2): هر چه مدت زمان خواب شیره در گرم‌خانه کوتاه‌تر باشد از ظرفیت گرم‌خانه بیشتر می‌توان استفاده کرد و تعداد دفعات پخت بیشتر خواهد شد.
- قطر نبات (R_3): قطر و سایز نبات به عنوان پارامتر قابل توجه مشتریان است و نبات دارای قطر کم یا قطر زیاد مطلوب مشتریان نیست و باید دارای یک اندازه‌ی مشخصی باشد که با توجه به نظرسنجی که از واحد فروش کارخانه انجام شد، اندازه‌ی دو سانتی‌متر مطلوب مشتریان است.

آزمایش بر اساس حدود تغییرات این دو متغیر ایجاد شده است که این بازه توسط ناظر فنی کارخانه با توجه به اطلاعات و تجربه‌ی ایشان مدنظر قرار گرفته است. سپس با وارد کردن حدود بریکس و دمای گرم‌خانه در نرم‌افزار Minitab طراحی آزمایش‌ها صورت می‌پذیرد که ۱۳ آزمایش با توجه به حدود مورد نظر ایجاد شد، که در جدول ۱ آمده است:

عوامل	بازه‌ی تغیرات		
قابل کنترل	۱		-۱
بریکس X_1	۷۹/۵		۷۷
دمای گرم‌خانه X_2	۴۵		۳۵

برای بررسی صحت مدل از تحلیل واریانس و مقدار ضریب تعیین R^2 استفاده می‌شود. همان طورکه در جدول ۲ ملاحظه می‌شود مقدار آن برابر ۸۹/۸۵٪ است که نشان می‌دهد مدل ۸۹/۸۵ درصد داده‌ها را پوشش داده و از صحت بالایی برخوردار است.

در این قسمت معادله‌ی سطح پاسخ برای متغیر خروجی نبات به دست می‌آید:

$$R_1(x) = B_0 + B_1x_1 + B_2x_1^2$$

مقدار R^2 برای متغیر مدت زمان نگهداری در گرم‌خانه برابر ۹۸/۵۸ درصد است؛ یعنی مدل توانسته است ۹۵/۸۵ درصد داده‌ها را پوشش دهد.

و معادله‌ی سطح پاسخ آن به صورت زیر است:

$$R_2(x) = B_3B_4x_1 + B_5x_2B_6x_1^2 + B_7x_1x_2$$

و همچنین مقدار R^2 برای متغیر قطر نبات برابر ۹۴/۴۷ درصد است؛ یعنی مدل توانسته است ۹۴/۴۷ درصد داده‌هارا پوشش دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. نتایج متغیرهای پاسخ بر اساس خروجی آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	X_1 (بریکس)	X_2 (دمای تخلیه)	R_1 (خروجی نبات)	R_2 (زمان نگهداری)	R_3 (قطر نبات)
۱	۷۹/۵	۳۵	۴۵	۴۶	۲/۳
۲	۷۶/۴۸	۴۰	۳۱/۵۵	۱۱۸	۱/۸
۳	۷۸/۲۵	۴۰	۳۹/۷	۶۷	۱/۹
۴	۷۷	۴۵	۳۶	۱۲۰	۱/۷
۵	۷۸/۲۵	۴۰	۳۹/۲۸	۶۹/۵	۱/۹
۶	۷۸/۲۵	۴۰	۳۴/۵	۷۰	۲/۰
۷	۷۸/۲۵	۴۰	۳۴/۳	۶۸	۱/۹
۸	۷۸/۲۵	۴۷	۳۸	۷۵	۱/۸
۹	۷۹/۵	۴۵	۴۷	۵۵	۲/۱
۱۰	۸۰/۰۱	۴۰	۵۵	۴۸	۲/۷
۱۱	۷۸/۲۵	۳۳	۳۷	۶۳	۱/۹
۱۲	۷۸/۲۵	۴۰	۳۷/۳۸	۷۱	۲/۰
۱۳	۷۷	۳۵	۳۵/۲	۹۳/۵	۱/۸

جدول ۲. خلاصه‌ی نتایج مدل برای متغیر خروجی.

S	$R-sq$	$R-sq(adj)$	$R-sq(pred)$
٪۲/۲۱۸۶۷	٪۸۹/۸۵	٪۸۷/۸۲	٪۷۵/۹۰

جدول ۳. ضرایب متغیرها مربوط به متغیر پاسخ خروجی نبات.

$Term$	$Cofe$	$SE\ Cofe$	$T-Value$	$P-Value$	VIF
constant	۳۷/۲۶۷	۰/۸۰۱	۴۶/۵۱	۰/۰۰۰	
Brix	۶/۷۴۵	۰/۷۸۴	۸/۶۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰
Brix*Brix	۳/۱۸۱	۰/۸۳۴	۳/۸	۰/۰۰۰	۱/۰۰

و معادله‌ی سطح پاسخ با استفاده از ضرایب جدول ۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R_3(x) = B_8 B_9 x_1 + B_{10} x_2 + B_{11} x_1^2 + B_{12} x_2^2$$

مطابق شکل کلی برنامه‌ریزی آرمانی مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} & Min - w_1 d_1 + w_2 d_2 + w_3 (d_{31} + d_{32}) \\ & B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_1^2 - d_1 = T_1 \\ & B_3 + B_4 x_1 + B_5 x_2 + B_6 x_1^2 + B_7 x_1 x_2 + d_2 = T_2 \\ & B_8 + B_9 x_1 + B_{10} x_2 + B_{11} x_1^2 + B_{12} x_2^2 + d_{31} - d_{32} \\ & = T_3 - 1 \le x_1 \le 1 \\ & -1 \le x_2 \le 1 \end{aligned} \qquad (11)$$

محدودیت اول محدودیت مربوط به متغیر پاسخ خروجی نبات است و این متغیر از نوع LTB است؛ به عبارتی هر چه مقدار این متغیر بیشتر باشد، بهتر است.

محدودیت دوم محدودیت مربوط به متغیر پاسخ مدت زمان نگهداری درگرم‌خانه است و این متغیر از نوع STB است؛ به عبارتی هر چه مقدار این متغیر کمتر باشد، بهتر است.

محدودیت سوم محدودیت مربوط به متغیر پاسخ قطر نبات است و این متغیر از نوع NTB است؛ به عبارتی هم بیشتر و هم کمتر از مقدار مورد نظر نامطلوب است.

دو محدودیت آخر نیز حدود متغیرهای کنترلی بریکس و دمای گرم‌خانه را نشان می‌دهند.

در این پژوهش با استفاده از نظر مدیرکارخانه وزن هر متغیر پاسخ پرسیده شده است.

وزن متغیر پاسخ خروجی نبات = ۰/۴۵

وزن متغیر پاسخ زمان خواب = ۰/۳۵

وزن متغیر پاسخ قطر نبات = ۰/۲

درباره‌ی مقدار آرمانی هر متغیر پاسخ نیز با توجه به نظر ناظر فنی و مدیرکارخانه مقادیر زیر در نظر گرفته شده است:

مقدار آرمانی خروجی نبات از هر پاتیل = ۴۰ کیلوگرم؛

مقدار آرمانی زمان خواب و نگهداری درگرم‌خانه = ۶۰ ساعت؛

مقدار آرمانی قطر نبات = ۲ سانتی‌متر؛

با توجه به این‌که ضرایب متغیرهای انحراف از آرمان باید بدون واحد شوند، ضرایب باید بر مقدار آرمان همان متغیر تقسیم شود.

در نتیجه مدل به صورت زیر خواهد بود:

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. مقایسه‌ی تعداد اعداد تصادفی بر اساس مقدار تابع هدف و زمان حل.

تعداد اعداد تصادفی	تعداد سناریو	مقدار تابع هدف	مقدار X_1	مقدار X_2	زمان حل (ثانیه)	زمان تخمینی (ثانیه)	زمان حل (روز)
۲	۸۱۹۲	-۰/۰۱۰	۰/۶۸۹	۱	۱۳۹۸۴۱	-	۱/۶
۳	۱۵۹۴۳۲۳	-	-	-	-	۲۷۲۱۵۷۸۶/۴۶	۳۱۴/۹
۵	۱۲۲۰۷۰۳۱۲۵	-	-	-	-	۲۰۸۳۷۹۳۲۸۲۵	۲۴۱۱۷۹/۱

$$Min = -۰/۰۱۱۲۵d_۱ + ۰/۰۰۵۸۳d_۲ + ۰/۱(d_{۳۱} + d_{۳۲})$$
$$B_۰ + B_۱x_۱ + B_۲x_۱^۲ - d_۱ = ۴۰$$
$$B_۳ + B_۴x_۱B_۵x_۲ + B_۶x_۱^۲ + B_۷x_۱x_۲ + d_۲ = ۶۰$$
$$B_۸ + B_۹x_۱ + B_{۱۰}x_۲ + B_{۱۱}x_۱^۲ + B_{۱۲}x_۲^۲ + d_{۳۱} - d_{۳۲} = ۲$$
$$-۱ \le x_۱ \le ۱$$
$$-۱ \le x_۲ \le ۱ \qquad (۱۲)$$

مدل‌سازی به شکل برنامه‌ریزی آرمانی انجام شد؛ در این مرحله باید مدل بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی به دست آید.

همان طورکه قبلاً توضیح داده شد، در حالت تصادفی باید سناریوهای مختلف برای مدل نوشته شود و با توجه به روش برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی مدل برای تمام سناریوها در نرم‌افزار GAMS نوشته می‌شود و نتایج از نظر مقدار تابع هدف و زمان حل نسبت به تعداد اعداد تصادفی در نظرگرفته شده برای ضرایب مقایسه و بررسی می‌شود.

$$Min ۱/m^{۱۳}[(-۰/۰۱۱۲۵d_۱^۱ + ۰/۰۰۵۸۳d_۲^۱ + ۰/۱(d_{۳۱}^۱ + d_{۳۲}^۱))$$
$$+(-۰/۰۱۱۲۵d_۱^۲ + ۰/۰۰۵۸۳d_۲^۲ + ۰/۱(d_{۳۱}^۲ + d_{۳۲}^۲)) + ...$$
$$+(-۰/۰۱۱۲۵d_۱^n + ۰/۰۰۵۸۳d_۲^n + ۰/۱(d_{۳۱}^n + d_{۳۲}^n))]$$
$$-۱ \le x_۱ \le ۱ - ۱ \le x_۲ \le ۱$$
$$B_۰^۱ + B_۱^۱x_۱ + B_۲^۱x_۱^۲ - d_۱^۱ = ۴۰$$
$$B_۳^۱ + B_۴^۱x_۱ + B_۵^۱x_۲ + B_۶^۱x_۱^۲ + B_۷^۱x_۱x_۲$$
$$+d_۲^۱ = ۶۰$$
$$B_۸^۱ + B_۹^۱x_۱ + B_{۱۰}^۱x_۲ + B_{۱۱}^۱x_۱^۲ + B_{۱۲}^۱x_۲^۲$$
$$+d_{۳۱}^۱ - d_{۳۲}^۱ = ۲$$
$$B_۰^۲ + B_۱^۲x_۱ + B_۲^۲x_۱^۲ + d_۱^۲ = ۴۰$$
$$B_۳^۲ + B_۴^۲x_۱ + B_۵^۲x_۲ + B_۶^۲x_۱^۲ + B_۷^۲x_۱x_۲$$
$$+d_۲^۲ = ۶۰$$
$$B_۸^۲ + B_۹^۲x_۱ + B_{۱۰}^۲x_۲ + B_{۱۱}^۲x_۱^۲ + B_{۱۲}^۲x_۲^۲$$
$$+d_{۳۱}^۲ - d_{۳۲}^۲ = ۲$$
$$B_۰^۳ + B_۱^۳x_۱ + B_۲^۳x_۱^۲ - d_۱^۳ = ۴۰$$
$$B_۳^۳ + B_۴^۳x_۱ + B_۵^۳x_۲ + B_۶^۳x_۱^۲ + B_۷^۳x_۱x_۲$$
$$+d_۲^۳ = ۶۰$$
$$B_۸^۳ + B_۹^۳x_۱ + B_{۱۰}^۳x_۲ + B_{۱۱}^۳x_۱^۲ + B_{۱۲}^۳x_۲^۲$$
$$+d_{۳۱}^۳ - d_{۳۲}^۳ = ۲$$

.

.

.

$$B_۰^n + B_۱^n x_۱ + B_۲^n x_۱^۲ - d_۱^n = ۴۰$$
$$B_۳^n + B_۴^n x_۱ + B_۵^n x_۲ + B_۶^n x_۱^۲ + B_۷^n x_۱x_۲$$
$$+d_۲^n = ۶۰$$
$$B_۸^n + B_۹^n x_۱ + B_{۱۰}^n x_۲ + b_{۱۱}^n x_۱^۲ + B_{۱۲}^n x_۲^۲$$
$$+d_{۳۱}^n - d_{۳۲}^n = ۲ \qquad (۱۳)$$

در مرحله‌ی اول برای هر ضریب ۲ عدد تصادفی بر اساس میانگین و واریانس هر ضریب در معادله رگرسیون به دست می‌آید در این حالت تعداد سناریوها با توجه به این‌که ۱۳ ضریب وجود دارد برابر $۲^{۱۳}$ خواهد شد و سپس ۳ عدد تصادفی در نظر گرفته می‌شود و تعداد سناریوها برابر $۳^{۱۳}$ حاصل می‌شود و به همین ترتیب تعداد اعداد تصادفی برای هر ضریب را افزایش داده و زمان حل و مقدار تابع هدف توسط نرم‌افزار GAMS به دست می‌آید.

در جدول ۴ مقایسه بین تعداد اعداد تصادفی در نظرگرفته شده و مقدار تابع هدف و زمان حل توسط نرم‌افزار آمده است:

همان طورکه ملاحظه می‌شود، مقدار تابع هدف برابر ۰/۰۱۰- است و مقادیر متغیرهای کنترلی به شرح زیر است:

$X_۱ = ۰/۶۸۹$ در نتیجه طبق تعریف اولیه برای متغیر بریکس، مقدار بهینه‌ی آن برابر ۷۹/۱۱ است.

$X_۲ = ۱$ در نتیجه طبق تعریف اولیه برای متغیر دمای گرم‌خانه، مقدار بهینه‌ی دما برابر ۴۵ درجه است.

همان طورکه ملاحظه می‌شود، به علت زمان حل بسیار بالا در صورتی که تعداد اعداد تصادفی بیشتر از ۲ باشد حل مدل منطقی نیست و در این صورت از ماتریس واریانس ـ کوواریانس استفاده می‌شود.

۵.۱. حل مدل با استفاده از ماتریس واریانس ـ کوواریانس

در این حالت نمونه‌های تصادفی برای هر ضریب با استفاده از میانگین ضرایب هر متغیر پاسخ و ماتریس واریانس ـ کوواریانس هر متغیر اعداد تصادفی به دست

جدول ۵. ماتریس واریانس ـ کوواریانس برای متغیر خروجی نبات.

	$B۰$	$B۱$	$B۲$
$B۰$	۰/۶۴۲۰۶۵	۰	-۰/۴۲۸۰۴
$B۱$	۰	۰/۶۱۵۳۱۴	۰
$B۲$	-۰/۴۲۸۰۴	۰	۰/۶۹۵۵۷

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶. ماتریس واریانس ـ کوواریانس برای متغیر مدت زمان نگهداری در گرم‌خانه.

	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$	$B7$
$B3$	۱٫۵۰۴۱۳۸۶۰۵	۰	$۴/۱۷۸۴۳ \times ۱۰^{-۱۳}$	-۱٫۰۰۲۷۵۹۰۷	۰
B_4	۰	۱٫۴۴۱۴۷	۰	۰	۰
$B5$	$۴/۱۷۸۴۳ \times ۱۰^{-۱۳}$	۰	۱٫۴۴۱۴۶۹۷۹۴	$-۲/۷۸۳۲ \times ۱۰^{-۱۷}$	۰
$B6$	-۱٫۰۰۲۷۵۹۰۷	۰	$-۲/۷۸۳۲ \times ۱۰^{-۱۷}$	۱٫۶۲۹۴۸۳۴۸۹	۰
$B7$	۰	۰	۰	۰	۲٫۸۸۲۹۳۲

جدول ۷. ماتریس واریانس ـ کوواریانس برای متغیر قطر نبات.

	$B8$	$B9$	$B10$	$B11$	$B12$
$B8$	۰٫۰۰۱۱۵۷	۰	$-۳/۲۱ \times ۱۰^{-۲۰}$	-۰٫۰۰۰۵۷۸۳۱۵	۰٫۰۰۰۵۷۸۳۱۵
$B9$	۰	۰٫۰۰۰۷۲۳	۰	۰	۰
$B10$	$-۳/۲۱ \times ۱۰^{-۲۰}$	۰	۰٫۰۰۰۷۲۲۸۹۵	$-۱/۶۰۵۱۵ \times ۱۰^{-۲۰}$	$-۱/۶۰۵۱۵ \times ۱۰^{-۲۰}$
$B11$	-۰٫۰۰۰۵۸	۰	$-۱/۶۰۵۱۵ \times ۱۰^{-۲۰}$	۰٫۰۰۰۸۳۱۳۲۷	۰٫۰۰۰۱۰۸۴۳۴
$B12$	-۰٫۰۰۰۵۸	۰	$-۱/۶۰۵۱۵ \times ۱۰^{-۲۰}$	۰٫۰۰۰۱۰۸۴۳۴	۰٫۰۰۰۸۳۱۳۲۷

جدول ۸. مقایسه‌ی تعداد اعداد تصادفی بر اساس مقدار تابع هدف و زمان حل.

تعداد اعداد تصادفی	تعداد سناریو	مقدار تابع هدف	مقدار X_1	مقدار X_2	زمان حل (ثانیه)
۲	۸	-۰٫۰۲۱	۰٫۶۰۱	۱	۴
۳	۲۷	-۰٫۰۱۸	۰٫۶۸۳	۱	۶
۵	۱۲۵	-۰٫۰۲۰	۰٫۷۶۴	۱	۸
۱۰	۱۰۰۰	-۰٫۰۱۸	۰٫۶۸۹	۱	۸۸۸
۱۵	۳۳۷۵	-۰٫۰۲۱	۱	۱	۴۰۲۰

جدول ۹. مقایسه‌ی دوحالت بر اساس زمان حل.

تعداد اعداد تصادفی	تعداد سناریو		زمان حل	
	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱ (ثانیه)	حالت ۲ (ثانیه)
۲	$۲^{۱۳} = ۸۱۹۲$	$۲^{۳} = ۸$	۱۳۹۸۴۱	۵
۳	$۳^{۱۳} = ۱۵۹۴۳۲۳$	$۳^{۳} = ۲۷$	۲۷۲۱۵۷۸۶٫۴۶	۶
۵	$۵^{۱۳} = ۱۲۲۰۷۰۳۱۲۵$	$۵^{۳} = ۱۲۵$	۲۰۸۳۷۹۳۲۸۲۵	۸
۱۰	$۱۰^{۱۳}$	$۱۰^{۳} = ۱۰۰۰$	-	۴۳۴
۱۵	$۱۵^{۱۳}$	$۱۵^{۳} = ۳۳۷۵$	-	۴۰۲۰

می‌آید؛ به صورتی که اگر ۲ عدد تصادفی برای هر ضریب ایجاد شود، با توجه به این‌که ۳ متغیر پاسخ وجود دارد، تعداد سناریو برابر با $۲^۳$ و اگر تعداد اعداد تصادفی ۳ باشد، تعداد سناریو برابر $۳^۳$ خواهد شد. (جداول ۵-۷)

در جدول ۸ برای تعداد اعداد تصادفی مختلف ـ در صورتی که از ماتریس واریانس ـ کوواریانس برای کاهش زمان حل استفاده شود ـ مقادیر تابع هدف، متغیرهای کنترلی، و زمان حل به دست آمده و مقادیر حاصل با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین در جدول ۹ مقایسه‌ی بین حالت اول با در نظرگرفتن تمام سناریوها و حالت دوم با توجه به در نظرگرفتن ماتریس واریانس ـ کوواریانس از لحاظ زمان حل (ثانیه) توسط نرم‌افزار آمده است. با توجه به این‌که در حالت اول در صورتی که تعداد اعداد تصادفی ۳ و بیشتر باشد زمان حل آن بسیار بالاست، محاسبات این جدول به صورت تخمینی است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش سطح پاسخ با رویکرد طراحی استوار برای بهینه‌سازی

www.SID.ir

Archive of SID

مشخصه‌های کیفیت استفاده شد و مدل حاصل به شکل برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی در حالت دومرحله‌یی به دست آمد. پس از حل مدل در هر مرحله با افزایش تعداد اعداد تصادفی ضرایب معادلات رگرسیون موجب افزایش تعداد حالات، سناریوها و محدودیت‌های مدل و در نتیجه افزایش چشمگیر زمان حل شد؛ به منظور کاهش زمان حل از ماتریس واریانس ـ کوواریانس استفاده شد.

۷. پیشنهادهایی برای مطالعات آتی

در محیط رقابتی امروز، سازمان‌ها و کارخانه‌های تولیدی برای دست‌یابی به سهم بیش‌تر در بازار به دنبال یافتن راهی مناسب و در عین حال کم‌هزینه برای افزایش کیفیت محصولات خود هستند تا رضایت مشتریان را افزایش دهند. یکی از روش‌های کم‌هزینه افزایش کیفیت، استفاده از طراحی استوار است که این رویکرد در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته و روش‌های مختلفی برای اجرای آن توسط افراد مختلف ارائه شده است که در بخش‌های پیش به آن پرداخته شد.

در ادامه پیشنهادهایی برای مطالعات آتی ارائه می‌شود:

۱. در پژوهش حاضر متغیرهای پاسخ از نوع کمّی و قابل اندازه‌گیری‌اند، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده متغیرهای پاسخ کیفی نیز بررسی شوند؛

۲. در این پژوهش متغیرهای اثرگذار قابل کنترل بر فرایند تولید در نظر گرفته شده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی اثر متغیرهای مزاحم که کنترل آنها مشکل و هزینه بر است نیز در نظر گرفته شود؛

۳. در این پژوهش برای کاهش زمان حل مدل توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی از ماتریس واریانس ـ کوواریانس برای هر متغیر پاسخ استفاده شد؛ پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های دیگر از ماتریس واریانس ـ کوواریانس تمام ضرایب مدل صرف‌نظر از تعداد متغیرهای پاسخ استفاده شود؛ در این صورت زمان حل به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد.

پانوشت‌ها

1. response variable
2. design of experiments
3. response surface methodology
4. noise factor
5. squared-error loss function
6. signal to noise ratio
7. dual response surface
8. location effect
9. dispersion effect
10. single response approach
11. goal programming (GP)
12. Multi objective decision making
13. nominal the best
14. smaller the better
15. larger the better

منابع (References)

1. Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, 6th Edition, John Wiley & Sons (2006).
2. Ryan, T. P., *Modern Experimental Design*, John Wiley & Sons (2007).
3. Birge, J. R. and Louveaux, F., *Introduction to stochastic programming*, Springer Science & Business Media (2011).
4. Robinson, T., Connie, M. Borro, R. and et al. "Robust parameter design: a review", *Quality and Reliability Engineering International*, **20**(1), pp. 81-101 (2004).
5. Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-48735-X (2005).
6. Ribeiro, J. S., Teofilo, R. F., Augusto, F. "Simultaneous optimization of the micro extraction of coffee volatiles using response surface methodology and principal component analysis", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **102**(1), pp. 45-52 (2010).
7. Pal, S. and Gauri, S. K. "Assessing effectiveness of the various performance metrics for multi-response optimization using multiple regression", *Computers & Industrial Engineering*, **59**(4), pp. 976-985 (2010).
8. Wang, J., Ma, Y. and Su, G. "Robust parameter design of dynamic multi-response system: a new integrated method", *Asian Journal on Quality*, **12**(1), pp. 67-79 (2011).
9. Ramezani, M., Bashiri, M. and Atkinson, A.C. "A goal programming-TOPSIS approach to multiple response optimization using the concepts of non-dominated solutions and prediction intervals", *Expert Systems with Applications*, **38**(8), pp. 9557-9563 (2011).
10. chen, Y. and Ye, K. "A bayesian hierarchical approach to dual response surface modelling", *Journal of Applied Statistics*, **38**(9), pp. 1963-1975 (2011).
11. Boylan, G. L. and Rae Cho, B., "Robust parameter design in embedded high-variability production processes: an alternative approach to mitigating sources of variability", *International Journal of Production Research*, **51**(15), pp. 4517-4538 (2013).
12. Ding, R. , Lin, K. J. and Wei, D. "Dual-response surface optimization: a weighted MSE approach", *Quality Engineering*, **16**(3), pp. 377-385 (2014).
13. Huang, T. Song, X. and Liu, X. "The multi-objective robust optimization of the loading path in the T-shape tube hydroforming based on dual response surface model", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **82**(9), pp. 1595-1605 (2015).
14. Tsung-Nan, T. and Liukkonen, M. "Robust parameter design for the micro-BGA stencil printing process using

www.SID.ir

Archive of SID

a fuzzy logic-based taguchi method", *applied soft computing*, **48**, pp. 124-136 (2016).

15. Hejazi, T. H., Seyyed Esfahani, M. and Taghinia, M. "Fully PCA-based approach to optimization of multiresponse-multistage problems with stochastic considerations", *Applied Mathematical Modelling*, **45**, pp. 530-550 (2017).

16. Freund, J. E., Miller, I. and Miller, M., *John E. Freund's Mathematical Statistics: With Applications*, Pearson Education India (2004).

www.SID.ir