

به کارگیری طراحی برای 6σ به منظور بهینه سازی پارامترهای اختلاط بلوک بتنی سبک

محمد صالح اولیا (دانشیار)

فرزانه شاکوهی* (کارشناس ارشد)

یحیی زارع مهرجردی (دانشیار)

محمد صابر فلاح نژاد (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دوری ۱ - ۳۱، شماره ۱/۲، ص. ۱۲۵-۱۳۳، (پادداشت شفی)

در تحقیق حاضر قصد داریم روش عام طراحی محصول و بر مبنای متدولوژی طراحی برای 6σ را ارائه دهیم. در روش ارائه شده، ادغام سه مفهوم بهینه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، طراحی قوی و بهینه سازی چندهدفه در چهار مرحله صورت می پذیرد: فرمول بندی، بهینه سازی، شبیه سازی و انتخاب. روش مذکور در تعیین بهترین طرح اختلاط بلوک بتنی سبک با در نظر گرفتن نیازهای مشتری در سه حوزه ی وزن، هزینه و استحکام اعمال شد. بدین منظور بعد از مدل سازی ریاضی بلوک با الگوریتم چندهدفه ی تعاملی و با توجه به ترجیحات تصمیم گیرنده، دوازده جواب بهینه ی پارتو در راستای حفظ احتمال رضایت محدودیت تولید شد. سپس با توجه به سه معیار درجه ی مطلوبیت، ضریب تغییرات (استحکام)، و صرفه جویی نسبت به جواب پایه بهترین طرح اختلاط در سطح ۱σ (در هر متر مکعب: سیمان ۴۰۹ کیلوگرم، الیاف ۱/۴ کیلوگرم، سیلیس ۱۲/۱۴ کیلوگرم و فوم ۸/۸ لیتر) برای پیاده سازی انتخاب شد.

owliams@yazd.ac.ir
farzaneh.shakouhi@gmail.com
yazm2000@yahoo.com
fallahnezhad@yazd.ac.ir

واژگان کلیدی: طراحی برای 6σ، طراحی قوی، بهینه سازی، قابلیت اطمینان، بلوک بتنی سبک.

۱. مقدمه

مرتب است، بلکه تکرارپذیری سیستم را نیز برای تولید محصولات مختلف تحت تأثیر قرار می دهد. با استفاده از یک رویکرد ساخت یافته همراه با طراحی قوی، می توان از مدت زمان لازم برای عرضه ی محصول به بازار کاست و در نتیجه منافع سازمان را افزایش داد.^[۱] بنابراین، ادغام روش های طراحی برای 6σ که در مرحله ی طراحی مورد استفاده قرار گرفتند و رویه های توسعه ی محصول و فرایند منجر به ارائه ی یک طرح قوی خواهد شد که در آن تغییرات مهندسی بسیاری لحاظ شده، به طوری که برای ماندن در صحنه ی رقابت و ایجاد مزیت رقابتی پایدار سازمان، نیازی ضروری است. برای اطمینان از موفقیت اجرای طراحی برای 6σ در سازمان وجود فرایند توسعه ی محصول یک پیش نیاز اولیه محسوب می شود. چنانچه سیستم مدیریت کیفیت جاری در سازمان، فرایندی پایدار ایجاد کند و خروجی آن، محصولاتی کم نقص باشد، آنگاه می توان گفت بسترسازی لازم صورت پذیرفته و می توان کار را شروع کرد. چنین سازمان هایی از آمادگی لازم برای اجرای پروژه های 6σ برخوردارند و اجرای پروژه ی طراحی برای 6σ در این سازمان ها موفقیت آمیز خواهد بود.^[۲]

در تحقیق حاضر قصد داریم روشی عمومی برای طراحی محصول و بر مبنای متدولوژی طراحی برای 6σ ارائه دهیم. روش ارائه شده به ادغام سه مفهوم بهینه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، طراحی قوی و بهینه سازی چندهدفه پرداخته و دارای

سازمان ها از دیرباز در یک نقطه اشتراک داشته اند و آن معطوف داشتن رویکردها و تمرکز تمام تلاش ها در جهت دست یابی به نتایج است؛ نتایجی که به ایجاد مزیت رقابتی منجر شود و در شاخص های عملکرد سازمان از جمله کسب درآمد بیشتر مؤثر و تعیین کننده باشد.^[۱] مسائلی چون افزایش هزینه های محصول، تأخیر در راه اندازی، از دست رفتن فرصت های بازار و طرح های غیر عملی که بیش از قبل ضررها و جریمه های بزرگتری را به همراه دارند در کنار چالش های دیگر باعث شده که «طراحی مناسب در اولین بار» یک نیاز حیاتی و مقرون به صرفه باشد.^[۲] در این میان روش های متنوعی برای بهبود کیفیت و مزیت رقابتی ماندگار در طراحی محصول به وجود آمده که «طراحی برای 6σ» یکی از آن هاست.

طراحی برای 6σ رویکردی قوی برای توسعه ی محصولات و خدمات به شمار می رود که هر فرایندی را قادر می سازد تا نیازهای مشتری را قبل از تولید محصول برآورده سازد. روش ها و مفاهیم به کار رفته در توسعه ی محصول و در فاز طراحی، ملزومات حرکت از سطح عملکرد 4σ به 5σ یا حرکت از سطح عملکرد 5σ به 6σ فراهم می آورد و نه تنها به خروجی فرایند و استفاده ی مؤثر از منابع

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۳/۱۷، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۳۱.

چهار مرحله است: فرمول‌بندی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و انتخاب. از این روش در تعیین بهترین طرح اختلاط بلوک بتنی سبک با در نظر گرفتن نیازهای مشتری در سه حوزه وزن، هزینه و استحکام بلوک بتنی سبک استفاده شد.

در ادامه مطالب این نوشتار، در بخش دوم به معرفی مبانی نظری و پیشینه موضوع و نیز ذکر نمونه‌هایی از موارد کاربرد روش طراحی برای ۶σ می‌پردازیم. در بخش سوم متدولوژی تحقیق تشریح و نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق معرفی می‌شود. در بخش چهارم مراحل لازم برای تعیین بهترین طرح اختلاط بلوک بتنی سبک بررسی شده و نهایتاً در بخش پنجم جمع‌بندی نتایج به دست آمده و نیز پیشنهادات لازم برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

۲. ادبیات موضوع

۲.۱. طراحی برای ۶σ

به باور برخی از محققین [۶۵] طراحی مجدد محصول یا فرایند زمانی مناسب است که این فرایند یا محصول جدید، سازمان را در رسیدن به اهداف استراتژیکش کمک کند. در واقع سازمان‌ها از «طراحی برای ۶σ» تا زمانی به‌عنوان راه حل استفاده می‌کنند که راه آسانی برای یافتن نقص‌ها و برطرف کردن آنها نیابند. شرکت‌هایی که از لحاظ عملکرد در سطح ۴σ یا ۵σ قرار دارند به طراحی برای ۶σ نیازمندند. [۶] اغلب شرکت‌ها تنها ۵ درصد بودجه‌شان را به طراحی اختصاص می‌دهند، درحالی که طراحی با ۷۰ درصد از هزینه‌های تولید و ۸۰ درصد از مشکلات کیفیتی در ارتباط است. هزینه‌های کیفیت ضعیف با صرف هزینه‌های بیشتر برای اصلاح مشکلات جبران می‌شود. [۸] این روش به دنبال کشف راه‌های مبتکرانه‌ی رضایت‌بخش و بیش از نیاز و انتظارات مشتری است و بهینه‌سازی عملکرد از طراحی محصول/خدمت و پس از آن بررسی تطابق الزامات تعیین‌شده توسط مشتریان با محصول/خدمت را تعقیب می‌کند. [۹] در واقع بهینه‌سازی یکی از ابزارهای مؤثر در طراحی برای ۶σ است که می‌تواند به مجریان طراحی برای ۶σ با تکیه بر کاهش زمان سریع محصول به بازار، کم‌ترین نقص و دوباره‌کاری پس از طراحی کمک کند (شکل ۱). [۱۰]

۲.۲. بهینه‌سازی

بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها درخصوص چگونگی حل مسائل مختلف به کار می‌رود. [۱۱] در بهینه‌سازی از یافتن بهترین جواب برای یک مسئله صحبت به میان می‌آید؛ لفظ بهترین به‌طور ضمنی بیان

می‌کند که بیش از یک جواب برای مسئله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین جواب وابسته است به مسئله‌ی مورد بررسی، روش حل و همچنین میزان خطای مجاز آن. بنابراین نحوه‌ی فرمول‌بندی مسئله نیز بر چگونگی تعریف بهترین جواب تأثیر مستقیم دارد.

۲.۲.۱. بهینه‌سازی چندهدفه

مسائل طراحی اغلب دارای ماهیتی چندهدفه‌اند که ممکن است این اهداف با هم در تضاد باشند. به‌منظور بررسی تبدلات بین این هدف‌های طراحی متضاد و بیان ویژگی‌های طراحی در دسترس، نیازمند فرموله‌کردن مسائل بهینه‌سازی با توابع چندگانه هستیم. در مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی متعارف، متغیرهای تصمیم‌گیری X -- که بهینه‌ساز یک بردار تابع هدف $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)\}$ است -- در سراسر فضای ممکن طراحی یافته می‌شود. این متغیرها تعیین‌کننده‌ی مجموعه‌ی از جواب‌های نامغلوب به نام «بهینه‌ی پارتو» برای دست‌یابی به سازش میان چندین هدف مختلف هستند. فرمول‌بندی استاندارد برای یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با M تابع هدف عبارت است از: [۱۱]

$$\begin{aligned} \text{Min } F(x) &= \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)\} \\ \text{subject to } g(x) &\leq 0 \\ h(x) &= 0 \\ X^L &\leq X \leq X^U \end{aligned} \quad (1)$$

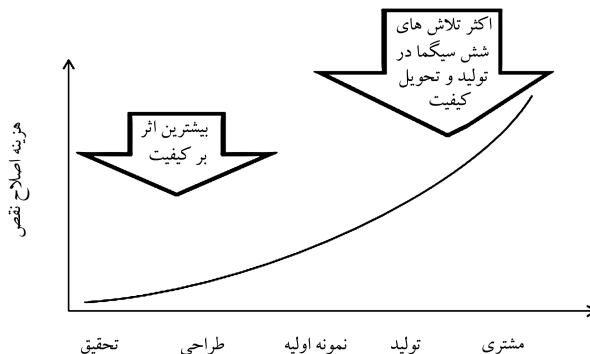
که در آن $h(x)$ و $g(x)$ نماینده‌ی توابع برابری و نابرابری محدودیت‌ها هستند؛ X ، X^L ، X^U به ترتیب بردارهای متغیر طراحی و کران پایین و بالای آن‌ها هستند. در روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه سعی می‌شود که مجموعه‌ی از جواب‌های سازشی (جواب‌های بهینه پارتو) تولید شود که با توجه به نظر تصمیم‌گیرنده یکی از این جواب‌ها انتخاب می‌شود. یک جواب را بهینه‌ی پارتو می‌نامند اگر، هیچ هدفی نتواند بدون قربانی‌کردن اهداف دیگر بهبود داده شود. مفهوم بهینه‌ی پارتو برای مسئله‌ی کمینه‌سازی چنین تعریف می‌شود: بردار x^0 بهینه‌ی پارتوست اگر و تنها اگر هیچ بردار شدنی دیگری همانند x پیدا نشود به طوری که برای تمامی m ها داشته باشیم: [۱۲] $f_m(x) \leq f_m(x^0), m = 1, \dots, M$

۲.۲.۲. بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت

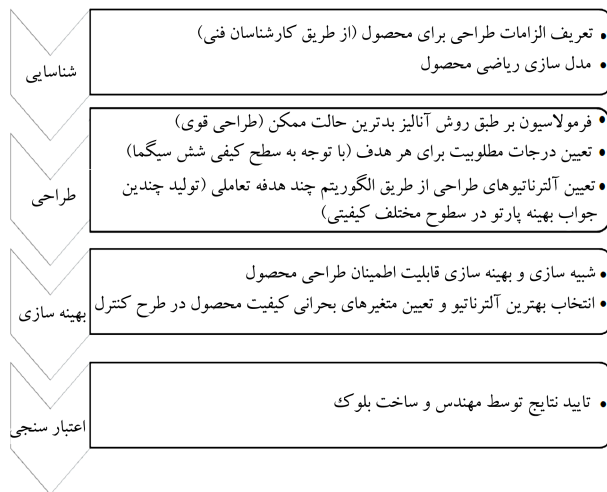
در بازار رقابتی امروز، این نکته که طراحی‌ها بهینه و در عین حال قابل اطمینان باشند از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. دو متدولوژی که بهینه‌سازی را برای عدم قطعیت محاسبه می‌کند عبارت‌اند از:

۱. طراحی قوی. این متد توسط تاگوچی ارائه شده و روشی است برای بهبود کیفیت محصول با کمینه‌کردن اثرات پراکندگی (به‌واسطه‌ی همزمان‌کردن بهینه‌سازی عملکرد میانگین و کمینه‌سازی پراکندگی عملکرد) بدون حذف علل آن. در طراحی قوی با انتشار عدم قطعیت به ارزیابی واریانس و میانگین عملکرد می‌پردازیم. براساس مطالعات انجام شده [۱۳] جنبه‌های چندگانه‌ی طراحی قوی از طریق تبدیل مسئله‌ی بهینه‌سازی متعارف به فرمول‌بندی طراحی قوی لحاظ می‌شود. مسئله‌ی متعارف عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) \\ \text{subject to } C_q(x) &\leq 0, \quad q = 1, \dots, Q \\ X^L &\leq X \leq X^U \end{aligned}$$



شکل ۱. مکان وقوع فعالیت‌های ۶σ



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم مطابق با مدل طراحی برای ۶σ.

حل مسائل بهینه‌سازی طراحی برای ۶σ متداول است.^[۱۴] با توجه به بررسی ادبیات موجود، فلوجارت متدولوژی در شکل ۲ نشان داده شده است. تمامی مسائل تحقیق در عملیات پژوهش حاضر با نرم‌افزار گمز ۲۲ و حل‌گر بارون حل شده است.

۴. تجزیه و تحلیل

در این فصل پس از معرفی مختصر سازمان مورد مطالعه، به مدل‌سازی محصول و اجرای گام به گام الگوریتم تشریح شده می‌پردازیم.

۱.۴. پیش‌زمینه‌ی مطالعه‌ی موردی

در دنیای پیشرفته‌ی امروزی و با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های مختلف علمی، صنعت بتن نیز دچار تحول شده است. تولید بتن سبک نیز حاصل همین پیشرفت‌هاست. بتن سبک یا بتن متخلخل در سال ۱۹۲۴ میلادی در کشور سوئد اختراع شد؛ این بتن علاوه بر کاهش بار مرده‌ی ساختمان از نیروی وارده بر سازه در اثر شتاب زلزله می‌کاهد و در صورت تخریب نیز وزن آوار حاصل کاهش می‌یابد. امروزه این بتن را با عنوان «بتن قرن» می‌شناسند. بتن سبک با توجه به ویژگی‌هایش دارای کاربردهای مختلفی است که برحسب وزن مخصوص و مقاومت فشاری آن تفکیک می‌شود.

CLC یکی از انواع بتن سبک است که با ایجاد حباب‌های هوا در اندازه‌های مختلف، در درون بتن ایجاد می‌شود. تولید این نوع بتن باروش غیراتوکلاو صورت می‌گیرد. ایجاد حباب هوا در این نوع بتن‌ها به یکی از دو روش مختلف فیزیکی یا استفاده از مواد افزودنی شیمیایی صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال، این محصول می‌تواند از ترکیب سیمان، ماسه‌ی بادی، آب و ماده‌ی شیمیایی تولیدکننده‌ی کف تشکیل شود.

۲.۴. شناسایی

در این فاز به معرفی پروژه و الزامات طراحی بلوک بتنی سبک می‌پردازیم. پروژه مورد نظر در راستای تعیین بهترین طرح اختلاط بتن سبک با هدف کاهش وزن و هزینه و در نظر گرفتن افزایش مقاومت فشاری اجرا می‌شود. اجرای صحیح این پروژه مستلزم تعاملات مداوم با کارشناس فنی است. در بلوک‌های سبک بحث وزن

طراحی قوی به‌عنوان یک مسئله‌ی طراحی دوهدفه تعریف می‌شود؛ مانند:

$$\text{Min} \quad [\mu_f, \sigma_f]$$

$$\text{subject to} \quad C_q(x) \leq 0, \quad q = 1, \dots, Q$$

$$X^L \leq X \leq X^U$$

که در آن μ_f و σ_f میانگین انحراف معیار از تابع هدف $f(x)$ است.

۲. روش‌های مدل‌سازی - امکان‌سنجی و بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان (RBDO).^[۱] در طراحی قوی، نه تنها دست‌یابی به طراحی قوی مهم است بلکه حفظ شدنی بودن طراحی تحت عدم قطعیت نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. برای رعایت شدنی بودن در مسئله طراحی دوهدفه، از آنالیز بدترین حالت ممکن استفاده شد.^[۱۳]

$$\text{Min} \quad [\mu_f, \sigma_f]$$

$$\text{subject to} \quad C_q(x) + k_q \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial C_q}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \leq 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q$$

$$X^L + \Delta x \leq X \leq X^U - \Delta x \quad (2)$$

که محدودیت‌های اصلی از طریق اضافه‌کردن جریمه به هرکدام از عوامل جریمه که توسط طراح تعیین می‌شود ($k_q, q = 1, 2, \dots, Q$) اصلاح خواهد شد.

بهینه‌سازی RBDO در واقع احتمالی کردن روش‌های مدل‌سازی - امکان‌سنجی است. در فرمول‌بندی متعارف RBDO، محدودیت‌ها از فرمول‌بندی قطعی برای محافظت از «عدم قطعیت» در متغیرهای طراحی و تضمین این که معیارهای عملکرد به‌طور مطلوب برآورده می‌شوند «به احتمالی» تبدیل می‌شود. برای مثال، محدودیت قطعی $g_i(x) \leq \hat{g}$ که در آن \hat{g} مقدار محدودشده‌ی برای این محدودیت است، تبدیل به یک محدودیت احتمالی می‌شود:

$$G_i(x) \equiv \hat{g} - g_i(x) \quad (3)$$

یک محدودیت احتمالی را می‌توان چنین نشان داد:

$$P[G_i(x) > 0] \geq R_i \quad (4)$$

که در آن R_i سطح قابلیت اطمینان مورد نظر است و محدودیت احتمالی از طریق تابع عملکرد $G_i(x)$ به‌همراه $G_i(x) \leq 0$ که نشان‌گر شکست است، توصیف می‌شود.

پس از مطالعه‌ی ادبیات موجود، مشاهده شده که طراحی برای ۶σ در چهار بخش: الف) مفهوم؛^[۱۵، ۱۶] ب) صنعت در کسب مزیت رقابتی کارخانه‌ها، طراحی محصول، کاهش ضایعات در تولید و ساده‌سازی فرایندها در شرکت‌های خودروسازی، و بهینه‌سازی؛^[۱۹-۱۶] ج) خدمات در شناسایی صدای مشتری و ترجمه‌ی آن به مشخصه‌های بحرانی نیازمندی‌های مشتری، بهبود مستمر کیفیت و ایجاد یک سیستم مدیریت تغییر فناوری اطلاعات؛^[۲۰-۲۲] د) بهینه‌سازی توابع چندهدفه با ترکیب دیگر روش‌ها^[۲۳، ۲۴] استفاده شده است.

۳. متدولوژی

در این تحقیق به توسعه‌ی مطالعه‌ی باریل و همکاران^[۲۳] می‌پردازیم. مدل طراحی برای ۶σ که توسط این محققین کاربرد داشته^[۲۳] عبارت است از IDOV که در

جدول ۱. تعریف متغیر طراحی و فضای طراحی.

متغیر طراحی	طراحی		کران بالا
	پایه	پایین	
x_1 : وزن سیمان (کیلوگرم)	۴۲۰	۴۰۰	۴۵۰
x_2 : وزن الیاف پلی‌پروپیلن (کیلوگرم)	۱	۱	۱٫۵
x_3 : وزن سیلیس (کیلوگرم)	۱۳	۸	۲۰
x_{21} : وزن آب ترکیب شده با سیمان (لیتر)	۱۷۰	۱۰۰	۲۵۰
x_{22} : وزن آب ترکیب شده با فوم (لیتر)	۱۹۰	۱۰	۲۵۰
x_5 : وزن فوم (لیتر)	۱۰	۱	۱۵

بعد از فرمول‌بندی، هر مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت مجزا توسط الگوریتم IMOP حل می‌شود و بر این اساس یک جدول $k \times k$ از مقادیر هدف تشکیل می‌شود. یعنی بار اول مسئله‌ی قطعی با در نظر گرفتن هدف اول حل می‌شود و جواب به دست آمده در دو تابع هدف دیگر گذاشته می‌شود. مسئله برای دو تابع هدف دیگر به صورت جداگانه حل می‌شود و جواب به دست آمده در دیگر توابع هدف گذاشته می‌شود. همین مسئله در سطح 6σ نیز اجرا می‌شود. پس یک جدول 3×3 از مقادیر توابع هدف تشکیل می‌شود. این نتایج برای مسئله‌ی قطعی و 6σ در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس این نتایج می‌توان مجموعه‌ی شدنی کاهش یافته را تعریف کرد. مجموعه‌ی شدنی کاهش یافته به مجموعه مقادیر پارامتر برای مسئله‌ی که قرار است حل شود ارتباط دارد و هر پارامتر به مقدار بیشینه و کمینه محدود می‌شود. مجموعه شدنی کاهش یافته برای بهینه‌سازی قطعی برابر است با:

$$731/470 \leq b_1 \leq 867/29, \quad 50635/690 \leq b_2 \leq 64209/9,$$

$$16/99181 \leq b_3 \leq 30/25$$

مجموعه‌ی شدنی کاهش یافته برای بهینه‌سازی 6σ نیز برابر است با:

$$733/304 \leq b_1 \leq 867/388, \quad 51960/41 \leq b_2 \leq 65059/71,$$

$$17/153 \leq b_3 \leq 30/003$$

از این مجموعه‌ها می‌توان در تعریف درجات مطلوبیت استفاده کرد. با توجه به سناریوی مطرح شده در گام چهارم الگوریتم IMOP، درجات مطلوبیت برای توابع هدف اول و دوم تعریف می‌شود. درجات مطلوبیت تابع هدف سوم با نظرات مهندسين تعريف مي‌شود. درجات مطلوبیت در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

در مرحله‌ی اول درجات مطلوبیت برای توابع هدف f_1 ، f_2 و f_3 به ترتیب در $30/003$ ، $51960/41$ و $733/304$ قرار داده می‌شود (منطقه‌ی بسیار مطلوب). در مرحله دوم درجات مطلوبیت در $50635/690$ ، $55235/235$ و $761/575$ تنظیم می‌شود (منطقه‌ی مطلوب). در مرحله سوم درجات مطلوبیت در $58510/06$ ، $789/846$ و $22/00$ قرار داده شده است (منطقه‌ی قابل تحمل). جواب‌های قابل اطمینان بهینه‌ی پارتو در جداول ۵ تا ۷ ارائه شده است.

۴.۴. بهینه‌سازی

در این مرحله تجزیه و تحلیل احتمال ارضاء محدودیت (قابلیت اطمینان) برای ۱۲ جواب بهینه‌ی به دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی ۱۲۰۰۰ نقطه انجام شده است. برای این منظور از یک توزیع نرمال که میانگین آن در جواب بهینه‌ی پارتو تنظیم شده و دارای انحراف معیار ۳٪ از میانگین برای همه‌ی متغیرهاست استفاده شده است. این سناریوها توسط نرم‌افزار اکسل تولید شده‌اند. ضریب تغییرات اندازه‌گیری پراکندگی نسبی و مستقل از واحد اندازه‌گیری است و نشانه‌ی از این موضوع است که چه مقدار در اطراف میانگین پراکندگی رخ می‌دهد. ضریب تغییرات پایین‌تر دارای داده‌های همگن‌تر و قوی‌تر است.

بر اساس جدول ۸، بهینه‌سازی چندهدفه‌ی قطعی نشان می‌دهد که وزن می‌تواند $8/79\%$ نسبت به جواب پایه کاهش یابد. همچنین هزینه و مقاومت فشاری نسبت به جواب پایه $13/92\%$ و $31/39\%$ به ترتیب نسبت به جواب پایه کاهش داشته‌اند. هنگامی که جواب قطعی با پراکندگی مرتبط می‌شود، احتمال ارضاء محدودیت دوم کم‌تر از بقیه است و این قابل قبول نیست، زیرا طراحی در $51/8\%$ موارد

و هزینه بسیار مهم است زیرا این نوع بلوک‌ها غیر باربر هستند و نیاز به حساسیت زیاد به مقاومت فشاری ندارند. بنابراین اهمیت و اولویت مقاومت فشاری کم‌تر از وزن و هزینه است. بدین منظور، با در نظر گرفتن این جزییات مدل‌سازی را آغاز کردیم. در ابتدا سه تابع هدف تعریف کردیم:

۱. وزن بلوک برای هر مترمکعب شامل مجموع وزن سیمان، ماسه (سیلیس)، فوم، الیاف و آب؛

۲. هزینه‌ی بلوک متشکل از هزینه‌ی یک کیلو سیمان (۷۶ تومان)، یک کیلو سیلیس (۷۰ تومان)، یک کیلو الیاف (۷۰۰۰ تومان) و یک لیتر فوم (۱۹۰۰ تومان)؛

۳. مقاومت فشاری؛ از آنجا که برای محاسبه‌ی مقاومت فشاری فرمولی در دسترس نیست و مقاومت فشاری در آزمایشگاه به دست می‌آید، با توجه به صحبت‌ها و راهنمایی‌های کارشناسان فنی مبنی بر وجود رابطه‌ی غیرخطی بین چگالی بعد از چهل روز و مقاومت فشاری، بر اساس چگالی و مقاومت‌های فشاری داده شده‌ی متناظر با چگالی بعد از ۴۰ روز از طریق درون‌یابی لاگرانژ به رابطه‌ی غیرخطی مقاومت فشاری برحسب چگالی بعد از ۴۰ روز رسیدیم. قبل از تعریف مدل‌سازی ریاضی به معرفی متغیرها و فضای طراحی در جدول ۱ می‌پردازیم. مدل‌سازی ریاضی بلوک بتنی سبک به شرح زیر است:

$$f_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_{21} + x_{22} + x_5$$

$$f_2 = 76x_1 + 7000x_2 + 70x3 + 1900x_5$$

$$f_3 = -7/4404798 * 10^{-y} (y^2) + 1/33184541 * 10^{-2} (y^2)$$

$$-0/69315501(y) + 122/14295$$

$$Con_1 = x_3/2/64 + x_1/3/15 + x_{21} + x_{22} + x_5 \leq 550$$

$$Con_2 = x_3/2/64 + x_1/3/15 + x_{21} + x_{22} + x_5 \geq 450$$

$$Con_3 = x_{22}/x_5 \leq 19$$

$$Con_4 = x_{22}/x_5 \geq 18/5$$

$$Con_5 = x_{21}/x_1 = 0/47$$

$$Con_6 = x_3/x_1 = 0/03$$

۳.۴. طراحی

در این قسمت پس از شناسایی، به طراحی (تولید چندین جواب بهینه‌ی پارتو توسط الگوریتم IMOP) می‌پردازیم. اولین گام در فاز طراحی، در نظر گرفتن پراکندگی در متغیرهای طراحی برای به دست آوردن چندین جواب قابل اطمینان بهینه‌ی پارتو است. فرمول‌بندی محدودیت‌ها طبق روش آنالیز بدترین حالت ممکن انجام می‌شود.

جدول ۲. مجموعه‌ی شدنی کاهش یافته برای مسئله‌ی بهینه‌سازی قطعی و ۶۵.

مجموعه شدنی کاهش یافته برای مسئله بهینه‌سازی قطعی								
x_1	x_2	x_3	x_{41}	x_{42}	x_5	کمینه‌کردن f_1	مقدار تابع f_2	مقدار تابع f_3
۴۰۰	۱	۱۲	۱۸۸	۱۲۳,۹۴۷	۶,۵۲۴	۷۳۱,۴۷۰	۵۰۶۳۵,۶۹۰	۱۶,۹۹۱۸
۴۰۰	۱	۱۲	۱۸۸	۱۲۳,۹۴۷	۶,۵۲۴	۷۳۱,۴۷۰	۵۰۶۳۵,۶۹۰	۱۶,۹۹۱۸
۴۵۰	۱,۵	۱۳,۵	۲۱۱,۵	۱۸۱,۷۵۸	۹,۷۷۱	۸۶۷,۰۲۹	۶۴۲۰۹,۹	۳۰,۲۵

مجموعه شدنی کاهش یافته برای مسئله بهینه‌سازی ۶۵								
x_1	x_2	x_3	x_{41}	x_{42}	x_5	کمینه‌کردن f_1	مقدار تابع f_2	مقدار تابع f_3
۴۰۰	۱	۱۱,۳۸۳	۱۸۷,۱۱۹	۱۲۶,۵۵۸	۷,۲۴۴	۷۳۳,۳۰۴	۵۱۹۶۰,۴۱	۱۷,۱۵۳
۴۰۰	۱	۱۱,۳۸۳	۱۸۷,۱۱۹	۱۲۶,۵۵۸	۷,۲۴۴	۷۳۳,۳۰۴	۵۱۹۶۰,۴۱	۱۷,۱۵۳
۴۵۰	۱,۵	۱۲,۸۸۳	۲۱۰,۶۱۹	۱۷۹,۱۴۵	۱۰,۲۴۱	۸۶۴,۳۸۸	۶۵۰۵۹,۷۱	۳۰,۰۰۳

جدول ۳. درجات مطلوبیت برای توابع هدف اول و دوم در سطح بهینه‌سازی ۶۵.

هدف	بسیار مطلوب	مطلوب	قابل تحمل	نامطلوب	بسیار نامطلوب
f_1 (وزن)	۷۳۳,۳۰۴	۷۶۱,۵۷۵	۷۸۹,۸۴۶	۸۱۸,۱۱۷	۸۴۶,۳۸۸
f_2 (هزینه)	۵۱۹۶۰,۴۱	۵۵۲۳۵,۲۳۵	۵۸۵۱۰,۰۰۶	۶۱۷۸۴,۸۸۵	۶۵۰۵۹,۷۱

$T: t_{m2}^+ \leq$ قابل تحمل $\leq t_{m3}^+$, $D: t_{m1}^+ \leq$ مطلوب $\leq t_{m2}^+$, $HD: t_{m1}^+ \leq$ بسیار مطلوب
 $U: t_{m2}^+ <$ نامطلوب $\leq t_{m4}^+$, $HU: t_{m2}^+ <$ بسیار نامطلوب $\leq t_{m5}^+$.

جدول ۴. درجات مطلوبیت برای تابع هدف سوم در سطح بهینه‌سازی ۶۵.

هدف	بسیار نامطلوب	نامطلوب	قابل تحمل	مطلوب	بسیار مطلوب
f_3 (مقاومت فشاری)	۱۷,۱۵۳	۲۰,۳۶۵۵	۲۲,۰۰۰	۲۶,۷۹۰۵	۳۰,۰۰۳

$T: t_{m3}^- \leq$ قابل تحمل $\leq t_{m2}^-$, $U: t_{m2}^- \leq$ نامطلوب $\leq t_{m3}^-$, $HU: t_{m5}^- <$ بسیار نامطلوب $< t_{m2}^-$,
 $D: t_{m2}^- <$ مطلوب $\leq t_{m1}^-$, $HD: t_{m1}^- \leq$ بسیار مطلوب.

جدول ۵. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه بر پایه امکان‌سنجی $f_1 \leq ۷۳۳,۳۰۴$, $f_2 \leq ۵۱۹۶۰,۴۱$ و $f_3 \geq ۳۰,۰۰۳$.

شرح	طراحی پایه	بهینه‌سازی قطعی	بهینه‌سازی ۱,۲۸۵۵	بهینه‌سازی ۳۵	بهینه‌سازی ۶۵
f_1	۸۰۴	۷۳۳,۳۰۳	۷۳۳,۲۸۳	۷۳۴,۰۹۷	۷۳۳,۳۰۵
f_2	۵۸۸۳۰	۵۰۶۴۰,۳	۵۱۰۸۳,۵۷	۵۲۰۱۶,۹۱	۵۱۹۶۰,۴۱
f_3	۲۵	۱۷,۱۵۲۷۱۹۱۱	۱۷,۱۵۰۹۵۶۱۲	۱۷,۲۲۲۸۲۰۹۷	۱۷,۱۵۲۸۹۵۴۲
x_1	۴۲۰	۴۰۲,۶۱۵	۴۰۰,۸۹۲	۴۰۱,۹۷	۴۰۰
x_2	۱	۱	۱,۰۲۲	۱,۰۹۱	۱
x_3	۱۳	۱۲,۰۷۸	۱۱,۸۹۴	۱۱,۷۲۷	۱۱,۳۸۳
x_{41}	۱۷۰	۱۸۹,۲۲۹	۱۸۸,۲۳۱	۱۸۸,۱۱۲	۱۸۷,۱۲۱
x_{42}	۱۹۰	۱۲۱,۹۶۲	۱۲۴,۵۳۸	۱۲۴,۳۵۰	۱۲۶,۵۵۷
x_5	۱۰	۶,۴۱۹	۶,۷۲۸	۶,۸۴۷	۷,۲۴۴

جدول ۶. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه بر پایه امکان‌سنجی $f_1 \leq 761,57$ ، $f_2 \leq 55235,23$ و $f_3 \geq 26,7905$.

شرح	طراحی پایه	بهینه‌سازی قطعی	بهینه‌سازی ۱,۲۸۵۵	بهینه‌سازی ۳۵	بهینه‌سازی ۶۵
f_1	۸۰۴	۷۶۱,۵۷۵	۷۶۱,۵۷۵	۷۶۱,۵۷۶	۷۶۱,۵۷۵
f_2	۵۸۸۳۰	۵۲۳۳۴,۷۷	۵۲۳۳۳,۹۱	۵۳۶۲۶,۵۷	۵۲۳۳۱,۴۹
f_3	۲۵	۱۹,۷۶۶۱۹۱۸۸	۱۹,۷۶۶۱۹۱۸۸	۱۹,۷۶۶۲۸۸۰۲	۱۹,۷۶۶۱۹۱۸۸
x_1	۴۲۰	۴۲۴,۴۳۱	۴۱۴,۹۷۰	۴۰۸,۹۶۸	۴۲۸,۵۰۷
x_2	۱	۱,۰۶۰	۱,۳۰۵	۱,۰۱۶	۱,۳۵۲
x_3	۱۳	۱۲,۷۳۳	۱۲,۳۱۷	۱۱,۹۶۰	۱۲,۲۳۸
x_{21}	۱۷۰	۱۹۹,۴۸۳	۱۹۴,۸۴۷	۱۹۱,۷۷۴	۲۰۰,۵۱۸
x_{22}	۱۹۰	۱۱۷,۶۷۵	۱۳۰,۹۲۶	۱۴۰,۱۷۶	۱۱۲,۴۶۳
x_5	۱۰	۶,۱۹۳	۷,۲۱۰	۷,۶۸۲	۶,۴۹۷

جدول ۷. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه بر پایه امکان‌سنجی $f_1 \leq 789,846$ ، $f_2 \leq 58510,06$ و $f_3 \geq 22,0$.

شرح	طراحی پایه	بهینه‌سازی قطعی	بهینه‌سازی ۱,۲۸۵۵	بهینه‌سازی ۳۵	بهینه‌سازی ۶۵
f_1	۸۰۴	۷۸۴,۳۱۴	۷۸۴,۳۱۴	۷۸۴,۳۱۳	۷۸۴,۳۲۳
f_2	۵۸۸۳۰	۵۸۵۰۹,۲۷	۵۸۵۱۳,۳۸	۵۸۵۰۸,۶۲	۵۸۵۷۹,۹۴
f_3	۲۵	۲۲,۰۰۰۰۷۲۸	۲۲,۰۰۰۰۷۲۸	۲۱,۹۹۹۹۷۲۸۴	۲۲,۰۰۰۰۹۷۲۴۷
x_1	۴۲۰	۴۰۷,۳۲۲	۴۰۹,۱۹۶	۴۱۱,۶۲۴	۴۱۵,۶۸۲
x_2	۱	۱,۴۲۱	۱,۴۰۲	۱,۳۷۶	۱,۳۴۴
x_3	۱۳	۱۲,۲۲۰	۱۲,۱۴۴	۱۲,۰۴۰	۱۱,۸۵۳
x_{21}	۱۷۰	۱۹۱,۴۴۲	۱۹۲,۱۳۳	۱۹۳,۰۲۲	۱۹۴,۴۹۰
x_{22}	۱۹۰	۱۶۳,۰۹۳	۱۶۰,۶۲۳	۱۵۷,۴۳۵	۱۵۲,۱۳۸
x_5	۱۰	۸,۸۱۶	۸,۸۱۶	۸,۸۱۶	۸,۸۱۶

سطح‌های مختلف کیفیت در جواب ۳ یکسان است و لذا به سراغ معیار بعدی می‌رویم. حال باید در میان سطح‌های بهینه‌سازی مختلف در جواب ۳ با توجه به معیار صرفه‌جویی نسبت به جواب پایه یکی را انتخاب کرد. جواب ۳ در سطح‌های بهینه‌سازی قطعی، 1σ و 6σ در تابع هدف اول و سوم درصد‌های صرفه‌جویی یکسان و برابر با $2,45\%$ و 12% دارند؛ در تابع هدف دوم این درصدها به ترتیب برابرند با $0,55\%$ ، $0,54\%$ و $0,43\%$. تمامی جواب‌های ذکر شده مقادیری بیشتر از مقاومت فشاری کمیته دارند و چون تابع وزن را می‌توان در تابع هزینه دید، پس تابع هزینه به‌عنوان معیار سنجش انتخاب شده است. چنان که مشاهده می‌کنید جواب ۳ در سطح 3σ بالاترین درصد صرفه‌جویی را نسبت به جواب پایه در هزینه دارد. در نهایت، جواب بهینه‌سازی در سطح 1σ در جواب ۳ به‌عنوان بهترین جواب با در نظر گرفتن سه معیار ذکر شده، انتخاب می‌شود. از دیدگاه ساخت (تولید)، دانستن این که کدام متغیرها برای کیفیت محصول و رضایت مشتری بحرانی‌اند، جالب است. شناسایی این متغیرها برای توسعه سیستم تولید و ارتباط آن با طرح‌های کنترل در واقع راستای دست‌یابی به محصولات با کیفیت، بسیار مهم است. طرح کنترل در واقع توصیف‌کننده اقداماتی است که در هر مرحله از فرایند مورد نیاز است تا اطمینان حاصل شود که تمام خروجی‌های فرایند تحت کنترل است. در تعیین بحرانی‌ترین متغیرها، شاخص حساسیت مرتبه‌ی اول برای هر متغیر

شکست خواهد خورد. بهینه‌سازی مبتنی بر امکان‌سنجی برای 90% ، $99,99999998\%$ اهداف در جدول ۸ نشان داده شده است. در مورد بهینه‌سازی مبتنی بر امکان‌سنجی، 90% نتایج نشان داده که مقادیر تابع هدف این سطح تقریباً تغییری نسبت به مقادیر تابع هدف بهینه‌سازی قطعی پیدا نکرده‌اند. همچنین جالب است متذکر شویم که با افزایش سطح σ ، تابع وزن و مقاومت فشاری در جواب حاصل از روش ابتکاری دچار تغییر می‌شود اما در جواب‌های دیگر تغییری رخ نمی‌دهد. تقریباً هیچ تغییری در جواب سوم در تابع هزینه با افزایش سطح σ مشاهده نمی‌شود. این نشان می‌دهد که در هر صورت باید بین کیفیت محصول و عملکرد مورد انتظار سازش ایجاد شود. نتایج نشان می‌دهد که هیچ تغییری در وزن و مقاومت فشاری هنگامی که سطح کیفیت افزایش پیدا می‌کند، رخ نمی‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود جواب‌های بهینه‌ی پارتو زیادی ممکن است تولید شود که در مرحله‌ی بعد یک جواب از بین جواب‌های تولید شده، برای پیاده‌سازی انتخاب می‌شود. برای مقایسه‌ی جواب‌ها سه معیار وجود دارد (جدول ۸): ۱. درجات مطلوبیت؛ ۲. ضریب تغییرات (استحکام)؛ ۳. صرفه‌جویی نسبت به جواب پایه. مقایسه‌ی حاصل از درجات مطلوبیت نشان داد که جواب ۳ بهترین جواب‌هاست زیرا هر سه تابع در جواب ۳ در سطح‌های بهینه‌سازی قطعی، 1σ و 6σ در ناحیه‌ی قابل تحمل واقع شده‌اند. مقایسه‌ی ضریب تغییرات نشان می‌دهد که ضریب تغییرات

جدول ۸. مقایسه‌ی جواب‌های بهینه‌ی پارتو.

درجه‌ی مطلوبیت	ضریب تغییرات	صرفه‌جویی نسبت به جواب پایه	معیارها
HD	۰٫۰۷	↓ ۸٫۷۹	f_1 (وزن)
HD	۰٫۴۱	↓ ۱۳٫۹۲	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۳	↓ ۳۱٫۳۹	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۱ (بهینه‌سازی σ)			
HD	۰٫۰۷	↓ ۸٫۸۰	f_1 (وزن)
HD	۰٫۴۱	↓ ۱۳٫۱۷	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۳	↓ ۳۱٫۴۰	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۱ (بهینه‌سازی $1,285\sigma$)			
D	۰٫۰۷	↓ ۸٫۶۹	f_1 (وزن)
D	۰٫۴۰	↓ ۱۱٫۵۸	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۳	↓ ۳۱٫۱۱	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۱ (بهینه‌سازی 3σ)			
HD	۰٫۰۷	↓ ۸٫۷۹	f_1 (وزن)
HD	۰٫۴۰	↓ ۱۱٫۶۸	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۳	↓ ۳۱٫۳۹	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۱ (بهینه‌سازی 6σ)			
D	۰٫۰۷	↓ ۵٫۲۸	f_1 (وزن)
D	۰٫۴۰	↓ ۱۱٫۰۴	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۳	↓ ۲۰٫۹۴	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۲ (بهینه‌سازی σ)			
D	۰٫۰۷	↓ ۵٫۲۸	f_1 (وزن)
D	۰٫۴۰	↓ ۱۱٫۰۴	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۲	↓ ۲۰٫۹۴	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۲ (بهینه‌سازی $1,285\sigma$)			
D	۰٫۰۷	↓ ۵٫۲۸	f_1 (وزن)
D	۰٫۳۹	↓ ۸٫۸۴	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۲	↓ ۲۰٫۹۳	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۲ (بهینه‌سازی 3σ)			
D	۰٫۰۷	↓ ۵٫۲۸	f_1 (وزن)
D	۰٫۴۰	↓ ۱۱٫۲۲	f_2 (هزینه)
HU	۰٫۰۲	↓ ۲۰٫۹۴	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۲ (بهینه‌سازی 6σ)			
T	۰٫۰۷	↓ ۲٫۴۵	f_1 (وزن)
T	۰٫۳۶	↓ ۰٫۵۴	f_2 (هزینه)
T	۰٫۰۲	↓ ۱۲٫۰۰	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۳ (بهینه‌سازی σ)			
T	۰٫۰۷	↓ ۲٫۴۵	f_1 (وزن)
T	۰٫۳۶	↓ ۰٫۵۵	f_2 (هزینه)
T	۰٫۰۲	↓ ۱۲٫۰۰	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۳ (بهینه‌سازی $1,285\sigma$)			
T	۰٫۰۷	↓ ۲٫۴۵	f_1 (وزن)
T	۰٫۳۶	↓ ۰٫۵۵	f_2 (هزینه)
U	۰٫۰۲	↓ ۱۲٫۰۰	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۳ (بهینه‌سازی 3σ)			
T	۰٫۰۷	↓ ۲٫۴۵	f_1 (وزن)
T	۰٫۳۶	↓ ۰٫۴۳	f_2 (هزینه)
T	۰٫۰۲	↓ ۱۲٫۰۰	f_3 (مقاومت فشاری)
جواب ۳ (بهینه‌سازی 6σ)			

جدول ۹. درصد پراکندگی از توابع هدف و محدودیت‌ها برای هر متغیر.

	درصد پراکندگی محدودیت				درصد پراکندگی تابع		
	Con _۶	Con _۵	Con _۳	Con _۱	f _۲	f _۲	f _۱
x _۱	۰٫۰۹	۱۸٫۱۹	۰	۳٫۱۱	۱۶٫۶۶	۰٫۰۱	۱۶٫۶۶
x _۲	۰	۰	۰	۰	۱۶٫۶۶	۹۳٫۱۲	۱۶٫۶۶
x _۳	۹۹٫۹۱	۰	۰	۴٫۴۲	۱۶٫۶۶	~ ۰	۱۶٫۶۶
x _{۲۱}	۰	۸۱٫۸۱	۰	۳۰٫۸۲	۱۶٫۶۶	۰	۱۶٫۶۶
x _{۲۲}	۰	۰	۰٫۲۸	۳۰٫۸۲	۱۶٫۶۶	۰	۱۶٫۶۶
x _۵	۰	۰	۹۹٫۷۲	۳۰٫۸۲	۱۶٫۶۶	۶٫۸۷	۱۶٫۶۶

محصول و اعمال رویکرد طراحی برای ۶۵ تحت عدم قطعیت ارائه دادیم. روش تحقیق حاضر یکی از راه‌های پیاده‌سازی ابزارها در مراحل چهارگانه‌ی شناسایی، طراحی، بهینه‌سازی و اعتبارسنجی رویکرد طراحی ۶۵ است. این متدولوژی ادغام سه مفهوم بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، طراحی قوی و بهینه‌سازی چندهدفه را در راستای پیاده‌سازی تعیین طرح اختلاط بهینه بلوک‌های نسل جدید غیر باربر ساختمانی سبک CLC اعمال کرده است.

جواب بهینه‌ی پارتو (جواب حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی در سطح ۳σ) به عنوان بهترین جواب انتخاب شد. نتایج نشان داد که متغیر x_۲ (الیاف پلی‌پروپیلن) علت بیشترین پراکندگی در تابع هزینه است. در حالی که x_۵، x_{۲۲}، x_{۲۱} و x_۳ بحرانی‌ترین متغیرها برای محدودیت‌ها هستند. این متغیرها به عنوان بحرانی‌ترین متغیرها برای عملکرد محصول و رضایت مشتری در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت، در فاز اعتبارسنجی پس از ارائه‌ی نتایج به کارشناس فنی و تولید بلوک، مقاومت فشاری آن محاسبه شد که با نتیجه‌ی به دست آمده تطابق داشت.

جواب حاصل از سطح ۳σ الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، با توجه به سه معیار ذکرشده به عنوان بهترین جواب انتخاب شده است. چنان که ملاحظه می‌شود نسبت به جواب پایه در دو تابع هدف اول و دوم مقدار ۰٫۵۵ و ۲٫۴۵ درصد صرفه‌جویی خواهیم داشت. بهبود در توابع هدف اول و دوم اتفاق افتاده است اما در تابع هدف سوم بهبود رخ نداد. می‌دانیم که در بلوک‌های سبک غیر باربر چون بار ساختمان را بر خود ندارند کم‌ترین مقاومت فشاری می‌تواند ۲۰ باشد. در نتیجه اولویت بهبود تابع هدف اول و دوم بیش‌تر از بهبود تابع هدف سوم است.

۱.۵. بحث

تحقیقات پیشین در راستای بهینه‌کردن طرح اختلاط از روش‌های تجربی و شبکه‌های تطبیق فازی - عصبی و روش تاگوچی استفاده کردند. که نمونه بلوک‌های ساخته شده به منظور تعیین بهترین طرح اختلاط بین ۸۱ تا ۲۴۰ بلوک متغیر بوده است. [۲۵-۲۷] کاهش هزینه و زمان در تعیین بهترین طرح اختلاط بلوک از مهم‌ترین دغدغه‌ی مهندسی و کارشناسان عمران است. بر این اساس، در این تحقیق بهترین طرح اختلاط بلوک سبک، بدون ساخت نمونه انجام شده است. همچنین برای اولین بار عدم قطعیت در تعیین طرح اختلاط بلوک در نظر گرفته شده است. با مشاهده‌ی چندین آلترناتیو تولید شده، می‌توان تصمیم‌گیری را با امکان انتخاب بیشتری در راستای ترجیحات مختلف ارائه کرد. اگر کارگاه بلوک‌سازی ترجیحش بر آن است که مقدار تابع هدف سوم با قربانی کردن توابع هدف اول و دوم، بهبود بیشتری باید می‌تواند از جواب الگوریتم پیشنهادی در سطح ۶۵ استفاده کند، گرچه قابلیت اطمینان این جواب نیز بنابر نتایج به دست آمده ۱۰۰٪ است. با استناد به نتیجه‌ی بخش تعیین بحرانی‌ترین متغیر، پیشنهاد می‌شود که با نظارت درست بر متغیر الیاف پلی‌پروپیلن، ۹۳ درصد از پراکندگی تابع هزینه را تحت نظر داشته و برنامه‌ی ویژه‌ی برای طرح کنترل این متغیر اعمال شود.

۲.۵. پیشنهادها برای تحقیقات آینده

۱. در بخش انتخاب به واسطه‌ی اهمیت و ترجیحات مختلف از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده شود.
۲. روش‌های استفاده شده با روش‌های دیگر جایگزین شود. جایگزین کردن روش آنالیز بدترین حالت ممکن با روش‌های آماری و استفاده از نظریه‌ی فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسئله.

از هر تابع هدف و محدودیت‌ها، مقدار اثرگذاری پراکندگی آن متغیر بر پراکندگی توابع هدف و محدودیت‌ها را محاسبه می‌کند. در جدول ۹ درصد پراکندگی از توابع هدف و محدودیت‌ها با توجه به متغیرهای x_i برای جواب ۳ در سطح بهینه‌سازی ۱۵ ارائه شده است. بالاترین درصد‌های هر ستون برجسته شده است.

متغیر x_۲ علت بیشترین پراکندگی در تابع هزینه است، در حالی که x_۵، x_{۲۲}، x_{۲۱} و x_۳ بحرانی‌ترین متغیرها برای محدودیت‌ها هستند. این متغیرها را به عنوان بحرانی‌ترین متغیرها برای عملکرد محصول و رضایت مشتری در نظر گرفته‌اند. با نظارت درست بر این متغیرها، امکان کنترل ۸۳٫۳٪ از پراکندگی در تابع هدف اول، ۹۹٫۹۹٪ از پراکندگی در تابع هدف دوم، ۸۳٫۳٪ از پراکندگی در تابع هدف سوم، ۹۶٫۸۹٪ از پراکندگی در محدودیت‌های اول و دوم، ۱۰۰٪ پراکندگی در محدودیت‌های سوم و چهارم، ۸۱٫۸۱٪ از پراکندگی در محدودیت پنجم، و ۹۱٫۹۹٪ از پراکندگی در محدودیت ششم وجود دارد. این متغیرها باید در طرح کنترل به منظور اندازه‌گیری و نظارت ادغام شوند. گسترش رویه‌ی کنترل برای این متغیرها یک امر بسیار ضروری است.

۵.۴. اعتبارسنجی

جواب حاصل از سطح ۳σ در الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، با توجه به سه معیار ذکرشده به عنوان بهترین جواب انتخاب شده است. چنان که ملاحظه می‌شود نسبت به جواب پایه در دو تابع هدف اول و دوم ۲٫۳۹ و ۲٫۴۵ درصد صرفه‌جویی خواهیم داشت. بهبود در توابع هدف اول و دوم اتفاق افتاده است اما در تابع هدف سوم اگرچه بهبود رخ نداد، مقاومت فشاری بیش از استاندارد رعایت شده است. زیرا در بلوک‌های سبک غیر باربر به دلیل این که بار ساختمان را بر خود ندارند کم‌ترین مقاومت فشاری می‌تواند ۲۰ باشد. در نتیجه اولویت بهبود توابع هدف اول و دوم بیش‌تر از بهبود تابع هدف سوم است. در این مرحله طرح اختلاط به کارشناس فنی ارائه شده است. ایشان پس از مشاهده‌ی نتایج، بلوک را تولید کردند و مقاومت فشاری آن را اندازه گرفتند که برابر با ۲۲ بود و با نتیجه به دست آمده مطابقت داشت.

۵. نتیجه‌گیری

نیاز به طراحی بهینه و قوی مبتنی بر قابلیت اطمینان، به منظور جلوگیری از شکست محصول و کاهش زمان و هزینه در تمامی صنایع، از جمله صنعت ساختمان و مصالح ساختمانی، امری ضروری و مهم است. در این تحقیق، ما روشی را برای طراحی

1. reliability-based design optimization

منابع (References)

1. Amer, Y., Luong, L. and Lee, S.H. "Optimizing order fulfillment using design for six sigma and fuzzy logic", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, **3**(2), pp. 83-99 (2008).
2. http://www.juran.com/solutions_increase_sales_design_for_six_sigma.html.
3. Treichler, D., Carmichael, R., Kusmanoff, A., Lewis, J. and Berthiez, G. "Design for six sigma: 15 lessons learned", *Quality Progress*, **35**(1), pp. 33-42 (2002).
4. Simons, N. and Lindland, J., *The Relationship Between ISO 9001:2000 and Design for Six Sigma (DFSS)*, SAE Technical Paper, New York: Simons-White & Associates Inc. John (2001).
5. Pande, P.S., Neuman, R.P. and Cavanagh, R.R., *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies Are Honing Their Performance*, New York: McGraw-Hill (2000).
6. Eckes, G., *Making Six Sigma Last: Managing the Balance Between Cultural and Technical Change*, New York: John Wiley and Sons (2001).
7. Berryman, M.L. "DFSS and big payoffs", *Six Sigma Forum Magazine*, **2**(1), pp. 23-28 (2002).
8. Chowdhury, S., *Design for Six Sigma: The Revolutionary Strategy for Achieving Extraordinary Profits*, Chicago, IL, USA: Dearborn Trade, Kaplan (2002).
9. Gupta, P. "Design for six sigma and lean manufacturing", *Quality Technology Company*, **2**(2), pp. 56-64 (2001).
10. Luce, K., Trepanier, L., Ciochetto, F. and Goldman, L. "Simulation and optimization as effective DFSS tools", *Simulation Conference*, Orlando (2005).
11. Tappeta, R.V. and Renaud, J.E. "Interactive multiobjective optimization procedure", *AIAA Journal*, **37**(7), pp. 881-889 (1999).
12. Chankong, V. and Haimes, Y.Y. "The interactive surrogate worth trade-off (ISWT) method for multiobjective decision making", In S. Zionts (Ed.), *Multiple Criteria Problem Solving*, Springer-Verlag, pp. 42-67 (1977).
13. Chen, W., Wiecek, M.M. and Zhang, J. "Quality utility – A compromise programming approach to robust design", *Journal of Mechanical Design*, **121**, pp. 179-187 (1999).
14. Antony, F. "Design for six sigma: A breakthrough business improvement strategy for achieving competitive advantage", *Work Study*, **51**(1), pp. 6-8 (2002).
15. De Mast, J., Diepstraten, G. and Does, R. "Quality quandaries: Design for six sigma: Method and application", *Quality Engineering*, **23**(1), pp. 204-211 (2011).
16. Luce, K., Trepanier, L., Ciochetto, F. and Goldman, L. "Simulation and optimization as effective DFSS tools", *Simulation Conference*, Orlando (2005).
17. Kovach, J., Stringfellow, P., Turner, J. and Cho, B.R. "The house of competitiveness: The marriage of agile manufacturing, design for six sigma, and lean manufacturing with quality considerations", *Journal of Industrial Technology*, **21**(3), pp. 2-10 (2005).
18. Gremyr, I. and Fouquet, J. "Design for six sigma and lean product development", *International Journal of Lean Six Sigma*, **3**(1), pp. 45-58 (2012).
19. Basavaraj, Y., Prasad, K.V. and Naidu, N.V.R. "Improvement of process capability through six sigma and robust design: Case study at an Indian steel manufacture", *International Journal of Industrial Engineering*, **18**(9), pp. 482-492 (2011).
20. Amer, Y., Luong, L., Lee, S.H. and Wang, Y.C. "Implementing design for six sigma to supply chain design", *The International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore (2007).
21. Yun, E.K. and Chun, K.M. "Critical to quality in telemedicine service management: Application of DFSS (design for six sigma) and SERVQUAL", *Nursing Economic*, **26**(6), pp. 384-388 (2008).
22. Long, P., Kovach, J. and Ding, D. "A design for six sigma case Study: Creating an IT change management system for a mid-size accounting firm", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, **3**(7), pp. 56-72 (2011).
23. Baril, C., Yacout, S. and Clement, B. "Design for six sigma through collaborative multiobjective optimization", *Computers & Industrial Engineering*, **60**(1), pp. 43-55 (2011).
24. Shimoyama, K., Oyama, A. and Fujii, K. "A new efficient and useful Robust optimization approach—design for multi-objective six sigma", *Proceedings of the 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, **1**, pp. 950-957 (2005).
25. Beigi, H.M., Hosseinian, B. and Shafiq, P. "Concrete construction style high strength with light beads, stones and micro silica powder", *Journal of Engineerin*, **1**(19), pp. 127-134 (2008).
26. Najim, M., Sobhani, J. and Pourkhorshidi, A. "Design and modify the properties of no-slump concrete and its compressive strength prediction using adaptive neuro fuzzy approach", *Journal of Concrete Research*, **3**(1), pp. 21-31 (2011).
27. Esmaeilnia, M. and Nourian, M. "Effect of natural pozzolan on the mechanical properties and durability of concrete compacting (case study on green tuff)", *Sixth National Congress on Civil Engineering* (2013).