طرح اختلاط بتن با استفاده از اصول بهینه‌سازی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی

علیرضا حبیبی[1*]، هومن صفّاری[2]، وریا محمدی[3]

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کردستان، سنندج

۳- دانشجوی کارشناسی عمران، دانشگاه کردستان، سنندج

ar.habibi@uok.ac.ir *

خلاصه

به منظور تولید بهینه و انبوه بتن، یکی از اساسی‌ترین شاخص‌ها که باید تغییر یابد، طرح اختلاط آن است. هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک روش جدید برای طرح اختلاط بتن با استفاده از اصول بهینه‌سازی می‌باشد. البته با توجه به اینکه این تحقیق بر مبنای مطالعات تئوریک و همچنین آزمایشگاهی است، با در نظر داشتن شرایط ساخت بتن در ایران، مبنای کاربردی‌تری دارد. بدین منظور ابتدا مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن تعریف می‌شود، به صورتی که تاثیر نتایج آزمایشگاهی در آن لحاظ شده باشد. سپس با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، طرح اختلاط بهینه برای بتن با مقاومت مورد نظر بدست می‌آید. مدل توسعه یافته، قابلیت تعمیم برای سایر مسائل (منظور، تغییر در فرضیات در محدوده‌های قابل قبول) را به سادگی دارا است. نشان داده می‌شود که طرح اختلاط بهینه در حالت حداکثر شدن بزرگترین بعد درشت‌دانه و در نتیجه حداکثر شدن حجم شن مصرفی بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، طرح اختلاط بتن، نتایج آزمایشگاهی، حداقل هزینه

۱. مقدمه

امروزه حجم تولید و استفاده از بتن در سازه‌ها، حتی در ساختمان‌های معمول مسکونی رو به افزایش است، در حالیکه محدودیت سرمایه‌های موجود شرایط ویژه‌ای را به وجود آورده است. البته بتن نسبت به دیگر مصالح سازه‌ای از دیدگاه‌های گوناگون از جمله قابلیت کاهش هزینه تولید مزیت دارد. دلایل مذکور سبب اهمیت تحقیق بر روی تولید و استفاده بهینه از بتن و تمایل متخصصین به این موضوع شده است. با در نظر گرفتن تولید انبوه و نیمه انبوه بتن کاهش حتی اندکی از هزینه‌های تولید آن می‌تواند بسیار موثر باشد. البته این کاهش هزینه باید به صورتی انجام گیرد که دیگر خصوصیات بتن به ویژه مقاومت فشاری دچار تغییرات منفی نشوند.

از جمله مطالعات گذشته برای طرح اختلاط بهینه تحقیقات گسترده یه و همکارانش است. او در سال ۲۰۰۶ در پژوهشی هزینه بتن با مقاومت معمولی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کمینه کرده است [1]. وی ابتدا طرح اختلاط را به صورت مسئله بهینه‌سازی رابطه‌سازی کرد و دو واحد (ماژول) مدل‌سازی و بهینه‌یابی را تشکیل داد. سپس مسئله را با استفاده از واحد (ماژول) بهینه‌سازی بر پایه برنامه‌نویسی درجه دو و الگوریتم ژنتیک حل نمود. برای ارزیابی برنامه کامپیوتری حاصل از مجموع این واحدها، برنامه برای بدست آوردن طرح اختلاط بهینه با رنج اسلامپ ۵-۲۵ سانتی‌متر و مقاومت ۲۵-۵۵ مگاپاسکال استفاده گردید. کانون و مورتی نیز در سال ۲۰۰۳ نسبت اختلاط بهینه بتن را بدست آوردند [2]. آنها بر پایه مفاهیم بهینه-سازی یک روش طرح اختلاط بتن برای محاسبه بتن با کمترین هزینه ارائه دادند. در تحقیق آنها وضعیت کارایی و مقاومت بتن توسط وابستگی توابعشان به اجزاء طرح اختلاط در نظر گرفته شد. همچنین برای اطمینان از قابل قبول بودن مقادیر متفاوت سایز دانه‌ها، محدوده‌ای را برای دانه‌بندی در نظر گرفته شد. آنها یک برنامه کامپیوتری با نام COMP برای رابطه‌سازی مسئله و انجام بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن ارائه نمودند. برنامه ارائه شده، قابلیت اصلاح فرضیات یا اضافه کردن قیود جدید را داشت. دیگر تحقیقات در این حوزه البته دارای تفاوت‌های اساسی با این پژوهش‌ها است. به عنوان مثال مارسیا و همکارانش یک آزمایش اختلاط آماری برای بهینه نمودن مقادیر طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا ارائه دادند[3]. برای بهینه‌یابی بتن‌های ویژه نیز تحقیقات زیادی انجام گرفته است، از جمله یون و همکاران در سال ۲۰۰۳ از الگوریتم ژنتیک در نسبت اختلاط بتن با کارایی بالا استفاده نمودند [4]. آنها با اطلاع از مزایای فراوان این نوع بتن‌ها و توجه به این ضعف که رسیدن به کارایی مورد نظر در آنها نیاز به استفاده از مخلوط‌های آزمایشی برای

انتخاب ترکیب مورد درخواست دارد، روش جدیدی برای طرح اختلاط بتن با کارایی بالا به منظور کاهش مخلوط‌های آزمایشی پیشنهاد دادند. در تحقیق آنها بررسی‌های تجربی و تحلیلی برای بسط روش طراحی و بازبینی طرح اختلاط پیشنهادی انجام گرفت. همچنین بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی از دیگر کارهاست که توسط اوزبای وهمکارانش انجام شده است[5]. آنها در یک رتبه بندی میزان و اثر هر یک از نسبت‌ها را بر روی بتن خودمتراکم با مقاومت بالا در حالت‌های تازه وسخت شده نشان دادند. از جمله تحقیقات داخلی در زمینه مقادیر بهینه طرح اختلاط بتن، تعیین نسبت بهینه مواد در طرح اختلاط بتن غلطکی توسط رمضانیانپور و حسن خانی است[6]. آنها ابتدا اثر مصالح تشکیل دهنده بتن غلطکی یعنی سنگدانه‌ها، سیمان، آب و پوزولان بر خواص مقاومتی آن را بررسی کردند و نسبت‌هایشان را مورد ارزیابی قرار دادند. سپس شرایط سنگدانه را در تعیین نسبت‌های بهینه جهت دستیابی به حداکثر مقاومت بررسی نمودند. همچنین مستوفی نژاد و رئیسی تاثیر پودر سنگ و بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از منحنی-های هم پاسخ را بررسی کردند[7]. بهینه‌سازی هزینه بتن بر مبنای نتایج تعدادی طرح اختلاط تئوری، توسط حبیبی و یوسفی انجام شد [8]. آنها با استفاده از الگوریتم SLP طرح اختلاط بهینه بتن با مقاومت معمولی را ارائه نمودند.

مطالعه ادبیات موضوع نشان می‌دهد که با وجود اینکه تحقیقات گسترده در مورد روشهای سنتی طرح اختلاط بتن، تحقیقات محدودی در مورد روشهای طرح اختلاط بهینه وجود دارد. همچنین تحقیقات قبلی انجام یافته در مورد طرح اختلاط بهینه بتن، نشان می‌دهد که بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن معمولی بر مبنای اصول بهینه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی بصورت همزمان، مورد توجه قرار نگرفته است. هدف تحقیق حاضر، ارائه یک روش جدید برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن با مقاومت معمولی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. به این منظور ابتدا مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن توسعه داده شده و متغیرهای طراحی، تابع هدف، قیود طراحی تعریف می‌شوند. سپس محدودیت مقاومت فشاری بتن به عنوان یک قید اصلی، بر اساس نتایج آزمایشگاهی فرمولبندی می‌شود. جهت حل مسئله بهینه‌سازی طرح اختلاط، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) بکار گرفته می‌شود. برای نشان دادن کارآیی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی یک طرح اختلاط بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال انجام شده است. نتایج حاصله نشان می-دهد که روش پیشنهادی تحقیق، ضمن ارضا نمودن محدودیت مقاومت و سایر محدودیتهای طرح، قابلیت کاهش هزینه ساخت بتن را بطور موثری دارد.

۲. مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن

جهت ارائه یک مدل بهینه‌سازی مناسب و الگوریتم موثر برای طرح اختلاط بتن، لازم است که اجزای آن شامل متغیرهای طراحی، تابع هدف و قیود طراحی بصورت مناسب تعریف و فرمولبندی شوند. در این بخش جزئیات مربوط به این اجزا تشریح می‌گردد.

۲.۱. متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی در هر مسئله طراحی، پارامترهای مهمی هستند که تغییر در مقدار آنها می‌تواند طرح را بطور قابل توجهی متاثر سازد. اجزای اصلی تشکیل دهنده بتن آب، سیمان، درشت دانه و ریزدانه هستند که با تغییر هر کدام از آنها، مشخصه‌های طرح از جمله مقاومت فشاری، می‌تواند به شدت دچار تغییر گردد. البته در برخی شرایط، مواد و افزودنی‌های دیگری نیز به این چهار عنصر اضافه میگردد. اما با توجه به شرایط طبیعی اغلب کارگاه‌ها، در این تحقیق تنها همین عناصر اصلی لحاظ شده‌اند. بنابراین متغیرهای طراحی در مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن عبارتند از:

مقدار وزن آب (X_1)، مقدار وزن سیمان (X_2)، مقدار وزن درشت دانه (X_3) و مقدار وزن ریزدانه(X_4)

مقادیر متغیرهای طراحی برای تشکیل یک مترمکعب بتن تازه در نظر گرفته می‌شوند.

۲.۲. تابع هدف

برای مقایسه طرح اختلاط‌های مختلف با یکدیگر و تشخیص طرح اختلاط بهتر، باید معیار مناسبی تعریف و ارائه نمود. این معیار باید یک اسکالر و تابعی از متغیرهای طراحی باشد بطوریکه با مشخص بودن مقادیر پارامترهای طرح اختلاط، بتواند محاسبه گردد. توابع هدف متعددی با توجه به هدف طراحی و انتظار طراح از سازه بتنی، می‌تواند مورد نظر قرار گیرد. به عنوان نمونه اهدافی نظیر اسلامپ مورد نظر، مقاومت در برابر حمله سولفاتها و کلرها، مقاومت مشخصه فشاری و غیره می‌توانند به عنوان تابع هدف در مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن، مورد توجه قرار گیرند. در تحقیق حاضر، با

توجه به اهمیت کاهش هزینه ساخت بتن، هزینه ساخت یک واحد حجم بتن، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که باید حداقل گردد. به این ترتیب تابع هدف مسئله طرح اختلاط را می‌توان بصورت زیر فرموله نمود:

$$\text{Min COST} = C_1 \times X_1 + C_2 \times X_2 + C_3 \times X_3 + C_4 \times X_4 \quad (1)$$

که در C_1 آن هزینه واحد وزن آب، C_2 هزینه واحد وزن سیمان، C_3 هزینه واحد وزن ماسه، C_4 هزینه واحد وزن شن و X_i متغیرهای طراحی متناظر هستند. ضرایب هزینه قابل اصلاح است و در زمان های مختلف براساس شرایط اقتصادی تعیین می‌گردد. همچنین با توجه به وابسته بودن تابع هدف به صورت مستقیم به این ضرایب، روشن است که طرح اختلاط بهینه در شرایط مختلف متفاوت خواهد بود.

۳.۲. قیود طراحی

به منظور تعریف مدل یک مسئله، در صورت نیاز، محدودیت‌هایی که طرح را تحت تاثیر قرار می‌دهند را به عنوان قیود طراحی برای مدل در نظر می-گیرند. پاسخ طرح زمانی قابل قبول می‌باشد که متغیرهای طراحی، تمامی قیود تعریف شده را ارضا کنند.

بهینه‌سازی طرح اختلاط شامل متغیرهای ثانویه (مانند بزرگترین بعد سنگدانه) است، این متغیرها وابسته به متغیرهای اصلی هستند. اما برای استفاده عملی از طرح اختلاط و ساخت بتن از طریق طرح بهینه باید مقادیر هریک از آنها از طریق جداولی مشخص شود. بر این اساس لازم است که شرایط متغیرهای طراحی در هر گام از طرح اختلاط براساس ACI-211 شبیه‌سازی شوند[9]. جداول این آیین نامه همچنین محدودیت‌های اجرایی و دیگر حدود را نیز پوشش می‌دهد.

در طرح اختلاط بتن براساس روش پیشنهادی آیین نامه ACI-211 مقادیری (از جمله مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد انتظار برای بتن حاصل، وزن مخصوص ظاهری (چگالی) سیمان و سنگدانه‌ها، مدول نرمی ماسه، وزن شن و ماسه براساس حالت اشباع با سطح خشک، بازه مقدار اسلامپ، هواداری بتن، بزرگترین بعد درشت‌دانه و رطوبت‌ها از این جمله‌اند. طراح در انتخاب برخی از آنها مجبور به قبول مقدار و در بعضی دیگر دارای محدوده اختیار است.) به عنوان پیش فرض انتخاب شوند. از این نکته می‌توان برای شکل‌دهی مسئله بهینه‌سازی استفاده کرد، یعنی آن فرضیات را در محدوده مجاز متغیر در نظر گرفت و اجازه داد تا برای رسیدن به هدف خاصی بهترین مقدار را یابند در حالی که بقیه فرضیات مقدارشان ثابت است. هدف هر طرح اختلاط بدست آوردن مقادیر اجزاء اصلی بتن است که به صورت مشخص مستقیما تحت تاثیر تغییر این فرضیات هستند. بزرگترین بعد درشت‌دانه اغلب قابل انتخاب است و در این پژوهش نیز به عنوان متغیر اصلی در نظر گرفته شده و برمبنای آن چهار متغیر تابع هدف تغییر می‌کنند. ابتدا با توجه به بزرگترین بعد درشت‌دانه و مقدار اسلامپ فرض شده مقدار آب در واحد حجم بتن بدست می‌آید. از این مرحله دو نکته نتیجه می‌شود:

اولین قیدی که به مدل اعمال می‌شود قید مقاومت فشاری است که تضمین می‌کند طرح اختلاط محاسبه شده در حالت بهینه دارای مقاومت مشخصه لازم باشد. به منظور اعمال این قید نیاز به ایجاد رابطه بین مقاومت فشاری مورد نظر و متغیرهای طراحی می‌باشد. نحوه محاسبه این رابطه در ادامه بیان خواهد شد اما به صورت کلی به شکل زیر است.

$$g_1 \equiv -\overline{f}_c \le -f_c \quad (2)$$

در این رابطه $\overline{f}_c$ رابطه برازش داده شده از نتایج آزمایشگاهی و f_c مقامت فشاری ۲۸ روزه مورد انتظار برای بتن حاصل است.

این آیین نامه با در نظر گرفتن هردو جنبه مقاومت و کارآیی لازم برای نمونه ها، حداکثر نسبت آب به سیمان را تعیین می‌نماید. این نسبت توسط قید زیر کنترل می‌شود.

$$g_2 \equiv X_1 - B \times X_2 \le 0 \quad (3)$$

در این رابطه ضریب B حداکثر نسبت آب به سیمان است که با توجه به مقاومت مورد نظر از مرجع [9] بدست می‌آید.

همچنین در این مرجع محدوده تقریبی برای وزن مخصوص بتن تازه قابل برداشت است. قیود زیر به منظور پوشش این بازه تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} g_3 &\equiv X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \le C \\ g_4 &\equiv -X_1 - X_2 - X_3 - X_4 \le -D \end{aligned} \quad (4)$$

که در آنها ثابت C مقدار حداکثر و ثابت D مقدار حداقل وزن مخصوص بتن تازه هستند.

با توجه به اینکه معمولا نسبت‌های طرح اختلاط برای یک مترمکعب بتن تعیین می‌شود، لازم است که این محدودیت توسط یک قید طراحی کنترل شود. در این راستا قید زیر تعریف می‌شود.

$$g_5 \equiv A_1 \times X_1 + A_2 \times X_2 + A_3 \times X_3 + A_4 \times X_4 \le -1 \quad (5)$$

که در آن ضرایب A_1 تا A_4 حجم یک کیلوگرم از متغیرهای متناظر هستند (یک تقسیم بر وزن مخصوص).

بخش مهمی از بتن را خمیر بتن تشکیل می‌دهد که وظیفه جلوگیری از وجود حفره بین دانه‌های شن و ایجاد یکپارچگی در عمکرد دانه‌ها را دارد. محدوده مقداری خمیر بتن صریحا در آیین‌نامه ذکر نشده است اما برای مجموع حجم مصالح تشکیل دهنده خمیر بتن یعنی آب، سیمان و ماسه می‌توان قیود زیر را تعریف نمود.

$$\begin{aligned} g_6 &\equiv A_1 \times X_1 + A_2 \times X_2 + A_4 \times X_4 \le E \\ g_7 &\equiv -A_1 \times X_1 - A_2 \times X_2 - A_4 \times X_4 \le -F \end{aligned} \quad (6)$$

در این روابط ضرایب A_i مطابق با شرح داده شده در رابطه (۵) هستند و مقادیر E و F به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار خمیر بتن هستند.

علاوه بر این قیود، محدودیت مقدار هر کدام از متغیرهای طراحی از لحاظ اجرایی، به عنوان یک قید طراحی در نظر گرفته شده است.

$$g_8 \equiv X_i^L \le X_i \le X_i^U \quad (7)$$

همچنان که نشان داده شده است X_i^U کران بالا و X_i^L کران پایین هر یک از متغیرهای طراحی را نشان می‌دهد.

همانطور که ملاحظه می‌شود تمامی قیود طرح اختلاط به استثنای قید شماره ۱ (محدودیت مقاومت فشاری) توابع صریحی از متغیرهای طراحی هستند و با معلوم بودن ضرایب بکار رفته در آنها به سادگی تعیین می‌شوند. یکی از مشکلات اصلی یافتن طرح اختلاط بهینه که در تحقیقات محققین قبلی دیده می‌شود، مشخص نبودن تابع مقاومت فشاری می‌باشد. جهت رفع این مشکل و به منظور ارائه یک الگوریتم موثر بهینه‌یابی برای مسئله طرح اختلاط بتن در تحقیق حاضر، برای قید ۱ نیز رابطه‌ای صریح استخراج خواهد شد. در ادامه روشی موثر برای رابطه‌سازی و فرمولبندی قید محدودیت مقاومت فشاری بتن، تشریح می‌گردد.

۱.۳.۲ فرمولبندی قید مقاومت فشاری بتن

همانطور که در بخش قبل بیان شد لازم است قیدی تنظیم شود که حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد نظر را کنترل نماید. به این منظور رابطه غیر خطی زیر جهت افزایش دقت تخمین مقاومت فشاری، پیشنهاد می‌شود:

$$\overline{f}_C - \sum_i (c_i \times X_i) + \sum_i (c'_i \times X_i^2) + b = 0 \quad (8)$$

که در آن، c_iها، c'_iها و b ضرایب مجهولی می‌باشند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند.

تعیین رابطه مناسب برای مقاومت مشخصه بطوریکه دارای حداقل خطا در تخمین مقاومت باشد، خود مستلزم حل یک مسئله بهینه‌سازی نامقید است. در این حالت، متغیرهای طراحی مدل بهینه‌سازی، همان ضرایب مجهول معادله (8) هستند. همچنین تابع هدف، مقدار خطای ایجاد شده در معادله (8) است که بصورت مجذور مجموع مربعات تفاضل مقاومت فشاری بدست آمده از معادله و مقاومت فشاری واقعی بدست آمده از آزمایش، مطابق با معادله زیر، در نظر گرفته می‌شود:

$$Error = \sqrt{\left(\sum \left(\overline{f}_c(c_i, c'_i, b) - f_{ci}\right)^2\right)} \quad (9)$$

که در آن، $Error$ مقدار تابع هدف، $\overline{f}_c$ تابعی است برحسب ضرایب مجهول معادله است.همچنین f_{C_i} مقاومت‌های فشاری حاصل از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی است.

برای تعیین f_{C_i} ها در رابطه مورد نظر، از نتایج آزمایشگاهی استفاده گردید. به این منظور ابتدا طرح اختلاط چندین نمونه بتنی انجام گرفت. در این نمونه‌ها اسلامپ در محدوده‌ی ۲۵-۵۰، چگالی شن برابر۲/۶۴، چگالی ماسه برابر۲/۶۶ و چگالی سیمان ۳/۱۵ در نظر گرفته شدند. مقاومت مشخصه هر طرح از میانگین‌گیری مقاومت فشاری ۲۸ روزه سه نمونه بتنی محاسبه گردید و سپس در چند مرحله داده‌های دارای خطای غیر مجاز حذف

شدند. در نهایت ۱۵ نتیجه آزمایشگاهی، مطابق با اطلاعات جدول (۱)، برای محاسبه ضرایب مجهول بکار رفته در معادله (8)، مورد رجوع قرار گرفت. با حداقل سازی تابع هدف خطا، مطابق معادله (9)، ضرایب بهینه محاسبه شدند و در نتیجه معادله نهایی زیر برای تابع مقاومت فشاری حاصل گردید:

$$\overline{f}_C = 0.793\times X_1 + 0.7\times X_2 + 0.102\times X_3 - 0.417\times X_4 \\ -0.003\times X_1^2 - 0.001\times X_2^2 - 0.0001\times X_3^2 + 0.0001\times X_4^2 + 345 \quad (10)$$

مقدار خطای حاصل از معادله فوق در تخمین مقاومت فشاری هر طرح اختلاط محاسبه و در جدول (۱) خلاصه شده است. نتایج موجود در این جدول نشان می‌دهد که مقدار حداکثر خطای ایجاد شده که مربوط به آزمایش شماره ۲ می‌باشد، برابر ۵ درصد است و در نتیجه استفاده از معادله (10) می‌تواند دقت مطلوبی را در محاسبه مقاومت فشاری واقعی طرح اختلاط، تضمین نماید.

جدول ۱- اطلاعات نمونه های مرجع و مقدار خطای رابطه برازش داده شده

نمونه	آب Kg/M^3	سیمان Kg/M^3	شن Kg/M^3	ماسه Kg/M^3	مقاومت فشاری (آزمایشگاهی) Kg/cm^2	مقاومت فشاری (معادله ۳) Kg/cm^2	خطا Kg/cm^2	درصد خطا
1	150.05	217.504	950.336	1062.11	192.40	201.0097	-8.6097	4.283226
2	161.992	234.773	683.235	1300	193.95	203.9992	-10.049	5.181335
3	150	217.449	1268.24	744.315	200.2	205.1597	-4.9597	2.477373
4	150	217.420	905.798	1106.77	203.55	200.8574	2.6926	1.32282
5	150	217.418	712.582	1300	211.60	201.5889	10.0111	4.731144
6	161.992	234.773	683.235	1300	203.45	203.9992	-0.5492	0.269943
7	166	244	1100	1813	172.55	174.1999	-1.6499	0.956187
8	166	244	1098	1814	176.25	174.5883	1.6617	0.942809
9	166	244	1160	847	212.25	205.2417	7.0083	3.301908
10	150	254	946	1093	209.35	203.8634	5.4866	2.620779
11	168	200	1000	1036	188.85	190.450	-1.6	0.847233
12	213	361	528	1124	204.80	204.5234	0.2766	0.135059
13	168	247	1008	988	207.90	204.6052	3.2948	1.5848
14	166	332	1189	720	228.50	228.9692	-0.4692	0.205339
15	150	300	844	997	226	228.887	-2.887	1.277434

۳. مطالعه عددی

۳.۱. طرح اختلاط بهینه برای مقاومت ۲۵ مگاپاسکال

در این مثال فرض می‌شود که اسلامپ برابر ۵۰ میلی متر، مدول نرمی ماسه برابر ۲/۸، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مساوی با ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع، وزن مخصوص ظاهری شن خشک میله خورده برابر ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، سیمان تیپ ۱ دارای چگالی ۳/۱۵، چگالی ریزدانه ۲/۶۴ و چگالی درشت‌دانه ۲/۶۸ باشد. قیمت آب واحد در نظر گرفته شده و به نسبت آن هزینه هر کیلوگرم سیمان برابر ۶۰ واحد، هزینه هرکیلوگرم شن برابر ۸ واحد و هزینه هر کیلوگرم ماسه برابر ۷ واحد در نظر گرفته شده‌اند. بزرگترین بعد درشت‌دانه در محدوده ۹/۵ تا ۵۰ میلی‌متر قابل تغییر است.

بر اساس این فرضیات، فرمولبندی مسئله بهینه‌سازی به شرح زیر حاصل می‌شود:

$$\text{Min COST} = 1\times X_1 + 60\times X_2 + 7\times X_3 + 8\times X_4$$

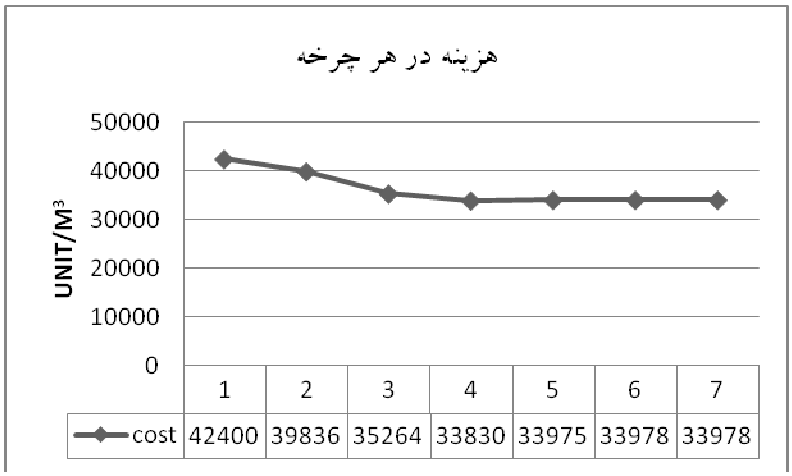
$$S.t: g_1 \equiv -\overline{f}_c \le -25$$
$$g_2 \equiv X_1 - 0.61 \times X_2 \le 0$$
$$g_3 \equiv X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \le 2445$$
$$g_4 \equiv -X_1 - X_2 - X_3 - X_4 \le -2280$$
$$g_5 \equiv -0.001 \times X_1 - 0.0003 \times X_2 - 0.0004 \times X_3 - 0.0004 \times X_4 \le -1$$
$$g_6 \equiv 0.001 \times X_1 + 0.0003 \times X_2 + 0.0004 \times X_4 \le 0.55$$
$$g_7 \equiv -0.001 \times X_1 - 0.0003 \times X_2 - 0.0004 \times X_4 \le -0.25$$
$$g_8 \equiv 154 \le X_1 \le 207$$
$$g_9 \equiv 736 \le X_3 \le 1184$$
$$0 \le X_2, X_4$$

پس از انتقال مدل بهینه‌سازی به نرم افزار MATLAB [10] و حل این مسئله ، نتایج مطابق با جدول (۲) به عنوان طرح بهینه محاسبه شدند. قیود فعال، یعنی قیودی که به صورت مساوی ارضاء شده‌اند، نیز برای این حالت ذکر شده است.

جدول ۲- نتایج نهایی بهینه‌سازی

قیود فعال	هزینه $UNIT/M^3$	مقاومت طرح Kg/cm^2	ماسه Kg/M^3	شن Kg/M^3	سیمان Kg/M^3	آب Kg/M^3	مقاومت موردنظر Kg/cm^2
g_1, g_2, g_6	33977.8	250	564.1	1184	339.2	206.9	250

در شکل (۱) تغییرات تابع هدف در چرخه‌های طراحی ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود طراحی پس از ۷ چرخه همگرا (مقدار دامنه تغییرات تابع هدف کمتر از 10E-6) شده است. تعداد کم چرخه‌های مورد نیاز نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای سرعت و نرخ همگرایی مطلوبی در حل مسئله بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن می‌باشد.



شکل ۱: روند همگرایی برای مقاومت ۲۵مگاپاسکال

با بررسی پروسه طراحی مشاهده می‌شود که با افزایش درشت‌دانه مقدار هزینه کاهش می‌یابد. همچنین آب و متناظر با آن سیمان، دارای رابطه مستقیم با هزینه هستند یعنی کاهش آب (سیمان) هزینه را کم می‌کند. الگوریتم عملکرد منطقی داشته و با توجه به قیمت بالای سیمان تمایل به کاهش آن دارد و

به منظور تامین محدودیت خمیر بتن، مقدار ماسه را کاهش می‌دهد. برای رسیدن به کمترین هزینه، مقاومت را کاهش می‌دهد و برای ارضاء آن شن را حداکثر و نسبت آب به سیمان را کم می‌کند. منطقی به نظر می‌رسد که با توجه به تمایل تابع هدف به کاهش هزینه، حتما یکی از قیود حداقل حجم یا حداقل وزن فعال باشند.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق طرح اختلاط بتن با دیدگاه جدیدی مورد بررسی قرار گرفت و یک روش جدید برای طرح اختلاط بتن معمولی براساس اصول بهینه‌سازی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی توسعه داده شد. به این منظور ابتدا طرح اختلاط بتن به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرموله شد که هدف از آن کاهش هزینه اجزاء اصلی بتن برای مخلوط تقریبا یک واحد حجم در حالی که مقاومت فشاری مشخصی را تامین کند، بود. ۴ متغیر طراحی شامل مقادیر وزنی ۴ ماده‌ی آب، سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه در نظر گرفته شدند و تابع هدف بهینه‌سازی هزینه ساخت یک متر مکعب بتن تعریف شد. محدودیتهای طراحی در نظر گرفته شده شامل مقاومت مشخصه، قیود حجمی، وزنی و اجرائی بودند که به عنوان قیود طراحی وارد مدل بهینه‌سازی شدند. جهت صریح‌سازی قید مقاومت فشاری، رابطه‌ای برای مقاومت فشاری بر حسب متغیرهای طراحی، بر اساس نتایج آزمایشگاهی استخراج گردید. با بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی برای حل مسئله طرح اختلاط، نتایج طرح اختلاط بهینه برای ۲۵ مگاپاسکال محاسبه شد.

نتایج بدست آمده نشان دادند که هزینه اجزاء تشکیل دهنده بتن برای رسیدن به مقاومت نمونه را می‌توان به صورت موثری کاهش داد. همچنین برای تامین مقاومت لازم برای بتن می‌توان درشت‌دانه را افزایش داد تا به مرز مجاز برسد، که با توجه به مقاومت آن و نیز ضریب کم آن در تابع هدف، این کار به صرفه است. رابطه مقاومت فشاری برای نتایج آزمایشگاهی پیچیده‌تر از تئوری است و می‌توان نتیجه گرفت که رابطه خطی بین اجزاء برای تامین مقاومت در عمل باقی نمی‌ماند و رفتار آن در عمل متفاوت است.

۵. مراجع

1. Yeh, IC. (2007), “Computer-aided design for optimum concrete mixtures,” Cement & Concrete Composites. 29 193–202, 2007.
2. Cannon, John P. Murti, G.R. Krishna. (1971),”Concrete Optimized Mix Proportioning (COMP),” Cement and Concrete Research. 4, 353-366, 1971.
3. Simon, Marcia J. Lagergren, Eric S. Snyder, Kenneth A. (1997), “Concrete Mixture Optimization using statistical mixture design methods,” International Symposium on High Performance Concrete. 230-244, 1997.
4. Yoon, Young-Soo. Kim, Joong-Hoon. Lim, Chul-Hyun. (2004), “Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete,” Cement and Concrete Research. 34, 409–420, 2004.
5. Ozbay, Erdog˘an. Oztas, Ahmet. Baykasoglu, Adil. Ozbebek, Hakan. (2009),” Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method,” Construction and Building Materials. 23, 694–702, 2009.
6. رمضانیانپور، ع.ا. حسن خانی، ع.، "طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی،" ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۸۲، اصفهان، ایران.
7. مستوفی نژاد، د. رئیسی، م.، "بررسی تاثیر پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس و بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از منحنی‌های هم پاسخ" استقلال. ۲، ۱ (۱۳۸۴)، ۴۰۱-۴۱۱، ۱۳۸۴.
8. حبیبی، ع.ر. یوسفی، م.، "بهینه کردن اجزاء اصلی بتن با استفاده از اصول بهینه سازی،" اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها. ۱۳۸۸.
9. ACI Standard 211.1, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1996.
10. MATLAB version 7.8.0, The Math Works, Optimization Toolboxes 2009.