مجلهٔ تحقیقات بتن
سال چهارم، شماره دوّم
پاییز و زمستان ۹۰،
ص۲۸-۱۷
تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۵

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

علیرضا حبیبی*
استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج
هومن صفّاری
دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کردستان، سنندج

چکیده

محدودیت منابع موجود و استفاده روزافزون از بتن، لزوم به‌کارگیری هدفمند از سرمایه‌ها را بویژه در تولید صنعتی و انبوه این نوع مصالح، به وجود آورده است. به منظور تولید بهینه و انبوه بتن، یکی از اساسی‌ترین شاخص‌ها که باید تغییر یابد، طرح اختلاط آن است. هدف از پژوهش حاضر، ارائهٔ یک روش جدید برای طرح اختلاط بتن با استفاده از اصول بهینه‌سازی می‌باشد. از طرفی با توجه به مبنای مطالعاتی همزمان تئوریک و آزمایشگاهی در این تحقیق، با در نظر داشتن شرایط ساخت بتن در ایران جنبه کاربردی آن دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. به این منظور ابتدا مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن به صورتی که تأثیر نتایج آزمایشگاهی در آن لحاظ شده باشد، تعریف می‌شود. سپس با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، طرح اختلاط بهینه برای بتن با مقاومت مورد نظر به‌دست می‌آید. پروسه و مدل ارائه شده در این مطالعه، با تغییرات کمی، قابلیت توسعه برای مسائل مشابه را دارد.

نتایج حاصل از مطالعه موردی، نشان می‌دهند که طرح اختلاط بهینه در حالت حداکثر شدن بزرگ‌ترین بعد درشت‌دانه و در نتیجه حداکثر شدن حجم شن مصرفی به‌دست می‌آید. روش توسعه‌یافته، علاوه بر خودکار نمودن پروسه طرح اختلاط توانایی حداقل نمودن هزینه‌های بتن‌ریزی را دارد.

واژه‌های کلیدی: طرح اختلاط، بتن، بهینه‌سازی، هزینه

* نویسنده مسئول: ar.habibi@uok.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه حجم تولید و استفاده از بتن در سازه‌ها، حتی در ساختمان‌های معمول مسکونی رو به افزایش است، در حالی که 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 دارای مزیت است. دلایل مذکور سبب اهمیت تحقیق در موضوع تولید و استفادهٔ بهینه از بتن و تمایل متخصصین به این حوزه شده است. با در نظر گرفتن تولید انبوه و نیمه‌انبوه بتن کاهش حتی اندکی از هزینه‌های تولید آن می‌تواند بسیار مؤثر باشد. البته این کاهش هزینه باید به صورتی انجام گیرد که دیگر خصوصیات بتن، به ویژه مقاومت فشاری آن، دچار تغییرات منفی نشوند. برای بتن‌های متعارف، انجمن بتن آمریکا (ACI)[۱]، در راهنمایی که برای نسبت‌های اختلاط منتشر نموده روشی را برای تهیه یک مخلوط ارائه کرده ولی روندی را برای یافتن نسبت‌هایی که همزمان تعدادی از معیارهای کارایی را برآورده نمایند عرضه نکرده است. همچنین در این دستورالعمل، برای بتن‌های با مقاومت بالا نیز روشی برای بهینه کردن مخلوط ارائه نشده است[۲].

مطالعات گذشته برای طرح اختلاط بهینه بتن شامل مطالعات در حوزهٔ بتن معمولی و بتن‌های خاص می‌شود. به عنوان مثال ژی و همکارانش در سال ۲۰۰۱ گزارشی را در ارتباط با توسعه طرح اختلاط بهینه بتن برای عرشه‌های پل منتشر نمودند[۳]. در این مطالعه ترکیبی، چهار آزمایش مختلف به منظور توصیف خواص مکانیکی و دوام بتن انجام شد. آزمایش‌ها شامل مقاومت مشخصه، آزمایش نفوذپذیری کلرید (آشتو تی[1]۲۷۷) و مقاومت در برابر ترک (یا آزمایش حلقه، آشتو صفحه ۳۴-۹۸[2])، همگی در روزهای مشخص و برای تمامی نمونه‌های بتنی و آزمایش انقباض بتن برای برخی نمونه‌ها می‌باشد. مطالعه ایشان شامل دو فاز می‌شود، فاز اول انتخاب ۱۸ طرح اختلاط و فاز دوم دقت‌سنجی طرح اختلاط‌های فاز اول و انتخاب نهایی برای استفاده در این زمینه. در این مطالعه درجه‌بندی خاکسترهای بادی مناسب و مزیت استفاده از درشت‌دانه‌ها به‌دست آمده است. به این صورت که افزایش مناسب درشت‌دانه می‌تواند نفوذپذیری، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و مقاومت ۲۸ روزه را بهبود بخشد. همچنین محدودهٔ پارامترهای طرح اختلاط بهینه بتن تعیین شد و نیز دو طرح اختلاط برای استفاده در تابستان و زمستان پیشنهاد شد. کانون و مورتی در سال ۲۰۰۳ نسبت اختلاط بهینهٔ بتن را به‌دست آوردند[۴]. آنها بر پایهٔ مفاهیم بهینه‌سازی یک روش طرح اختلاط بتن با کمترین هزینه ارائه دادند. در مطالعه 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 اندازه‌ی دانه‌ها، محدوده‌ای برای دانه‌بندی در نظر گرفته شد. آنها یک برنامه کامپیوتری با نام COMP برای رابطه‌سازی مسئله و انجام بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن ارائه نمودند. روش ارائه شده توسط آنها، قابلیت اصلاح فرضیات یا اضافه کردن قیود جدید را داشت. یه و همکارانش نیز تحقیقات گسترده‌ای را در این زمینه انجام داده‌اند. او در سال ۲۰۰۶ در پژوهشی هزینه بتن با مقاومت معمولی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کمینه کرد[۵]. وی ابتدا طرح اختلاط را به صورت مسئلهٔ بهینه‌سازی رابطه‌سازی نمود 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 به‌دست آوردن طرح اختلاط بهینه با محدودهٔ اسلامپ ۵-۲۵ سانتی‌متر و محدودهٔ مقاومت ۲۵-۵۵ مگاپاسکال استفاده گردید. حبیبی و یوسفی در سال ۱۳۸۸ (۲۰۰۹) بهینه‌سازی هزینهٔ بتن بر مبنای نتایج تعدادی طرح اختلاط تئوری را انجام دادند[۶]. آنها ابتدا با تعریف و تعیین یک قید مقاومت مشخصه طرح را کنترل نمودند. سپس با استفاده از الگوریتم SLP روشی برای طرح اختلاط بهینه بتن با مقاومت معمولی برای رسیدن به کمترین هزینه ارائه کردند. برای بهینه‌یابی بتن‌های ویژه نیز تحقیقات زیادی انجام گرفته است، از جمله سایمون و همکارانش در سال ۱۹۹۷ یک آزمایش اختلاط آماری را برای بهینه نمودن مقادیر طرح اختلاط بتن با کارایی بالا ارائه دادند[۲]. آنها برای محاسبه رابطه بین مقاومت فشاری و متغیرهای طراحی از چند جمله‌ای‌های درجه دو (Scheffe) استفاده نمودند. همچنین برای یافتن ضرایب این رابطه، ۳۶ طرح اختلاط انجام دادند.

در بتن‌های ویژه اغلب با توجه به استفاده از موادی خاص به منظور ایجاد خواص ویژه و از طرفی هزینه بالای اغلب این مواد، بهینه‌سازی اجزاء اصلی طرح اختلاط بتن می‌تواند سبب ذخیرهٔ منابع و نیز توجیه‌پذیری آنها گردد. خیاط و غزال در سال ۲۰۰۲ بهینه‌سازی بتن‌های خودمتراکم دارای سنگ آهک را با استفاده از

[1] AASHTO T277
[2] ring tests, AASHTO PP34-98

روش‌های طراحی فاکتوریل آماری[1] انجام دادند[۷]. در این مطالعه نشان دادند که جایگزینی ۱۰۰گرم در هر مترمکعب از سیمان با پرکننده سنگ آهک ریز، شکل‌پذیری و پایداری را بدون تاثیر منفی بر مقاومت یک روزه بهبود می‌بخشد. البته این نمونه‌ها حداکثر تا ۱۰ درصد کاهش مقاومت ۲۸ روزه را در مقایسه با بتن‌های مشابه بدون پرکننده نشان می‌دهد. همچنین استفاده از پرکننده هزینه را کاهش می‌دهد، به طوری‌که می‌تواند ضریب سیمان را نیز کاهش دهد. یون و همکاران در سال ۲۰۰۳ از الگوریتم ژنتیک در نسبت اختلاط بتن با کارایی بالا استفاده نمودند[۸]. آنها با توجه به مزایای فراوان این نوع بتن‌ها و در نظر گرفتن این نکته که رسیدن به کارایی مورد نظر در آنها نیاز به استفاده از مخلوط‌های آزمایشی برای انتخاب ترکیب مورد نظر 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. رمضانیانپور و حسن‌خانی در سال ۱۳۸۲ (۲۰۰۳) نسبت بهینه مواد در طرح اختلاط بتن غلتکی را تعیین نمودند [۹]. آنها ابتدا اثر مصالح تشکیل دهنده بتن غلتکی، یعنی سنگدانه‌ها، سیمان، آب و پوزولان، را بر خواص مقاومتی آن بررسی کردند و نسبت‌هایشان را مورد ارزیابی قرار دادند. سپس شرایط سنگدانه را در تعیین نسبت‌های بهینه جهت دستیابی به حداکثر مقاومت بررسی نمودند. بهرویان و زارعی در سال ۱۳۸۳ بهینه‌سازی بتن‌های پلیمری را انجام دادند [۱۰]. آنها از یکی از روش‌های بهینه‌سازی بتن پلیمری به پیشنهاد انستیتوی ملی استاندارد و تکنولوژی ایالات متحده استفاده نمودند. این مطالعه همزمان روی بتن‌های پلیمری اپوکسی و بتنهای پلیمری پلی‌استری انجام گرفت. با استفاده از مدل‌های آماری دورانی[2] و ۳۶ نمونه بتنی از هر نوع بتن طراحی گردید. فاکتورهای اصلی مورد مطالعه آنها دانسیته، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسته می‌باشند. در این مطالعه نشان داده شد که یک مدل طراحی که بر پایه یک تابع درجه دوم باشد، ایجاد کننده یک پایه مناسب برای بتن پلیمری است. مستوفی نژاد و رئیسی در سال ۱۳۸۴ (۲۰۰۵) تاثیر پودرسنگ و بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از منحنی‌های هم پاسخ[3] را بررسی کردند [۱۱]. در مطالعه آنها، مقاومت ۲۸ روزه، ۲۷ طرح اختلاط بر اساس نسبت‌های متفاوت آب، میکروسیلیس و پودرسنگ آهک، به مواد سیمانی مبنای محاسبات قرار گرفت. سپس نقش پودرسنگ آهک و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفت و بهینه‌سازی برای طرح اختلاط این نوع بتن‌ها انجام گرفت. اوزبای و همکارانش در سال ۲۰۰۹ بهینه‌سازی چند هدفه[4] را برای بتن‌های با مقاومت بالا با استفاده از روش تاگوچی انجام دادند[۱۲]. آنها در یک رتبه‌بندی میزان و اثر هر یک از نسبت‌ها را بر روی بتن خودمتراکم با مقاومت بالا در حالت‌های تازه وسخت شده نشان دادند. مورلی و کندسمی در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش منحنی‌های هم پاسخ، طرح اختلاط بهینه بتن‌های خود متراکم با مقاومت بالا[5] را مورد مطالعه قرار دادند[۱۳]. با استفاده از این روش، در این مطالعه آنها برنامه‌ای تجربی را برای بهینه‌سازی چهار جزء اصلی بتن محتوی خاکستر بادی برای شش معیار کارایی ارائه دادند. مدل ارائه شده توسط آنها توانایی شناسایی طرح اختلاط بهینه بتن و همچنین درصد بهینه مصرف هر یک از مواد مضاف را برای دستیابی به مقاومت مشخص شده، دارد.

مطالعه ادبیات موضوع نشان می‌دهد که با وجود تحقیقات گسترده در حوزهٔ روش‌های سنتی طرح اختلاط بتن، مطالعات محدودی در حوزهٔ 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 بتن‌های 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 و قیود طراحی تعریف می‌شوند. سپس محدودیت مقاومت فشاری بتن به عنوان یک قید اصلی، بر اساس نتایج آزمایشگاهی فرمول‌بندی می‌شود. جهت حل مسئلهٔ

[1] Statistical Factorial Design Methods
[2] Rotatable

[3] Response Surface Methodology (RSM)
[4] Multi-Objective Optimization
[5] High performance self compacting concrete (HPSCC)

بهینه‌سازی طرح اختلاط، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) به‌کار گرفته می‌شود. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی دو نوع طرح اختلاط بتن با مقاومت ۲۰ و ۲۵ مگاپاسکال انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تحقیق، ضمن ارضا نمودن محدودیت مقاومت و سایر محدودیت‌های طرح، قابلیت کاهش هزینه ساخت بتن را بطور موثری دارد.

۲. رابطه‌سازی مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن

هدف از بهینه‌سازی یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مهم طراحی (متغیرهای طراحی) برای حداقل (یا حداکثر) کردن یک کمیت (تابع هدف) تحت محدودیت‌های خاصی (قیود طراحی) می‌باشد. طراحی یک فرایند چرخه‌ای است. منظور از چرخه این است که قبل از این که یک طرح قابل قبول به‌دست آید سیستم‌های آزمایشی متعددی به دنبال هم تحلیل می‌شوند. جهت ارائهٔ 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 رابطه‌سازی شوند. رابطه‌سازی یک مسئله طراحی بهین، عبارت است از بیان مسئله به صورت یک عبارت ریاضی. در ادامه این بخش جزئیات مربوط به مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن تشریح می‌گردد.

۲-۱. متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی در هر مسئله طراحی، پارامترهای مهمی هستند که برای تشریح طراحی یک سیستم انتخاب می‌شوند و تغییر در مقدار آنها می‌تواند طرح را بطور قابل توجهی متأثر سازد. در طرح اختلاط بتن بر اساس روش پیشنهادی آیین‌نامه ACI-211 [۱] مقادیری از جمله مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد انتظار برای بتن، مدول نرمی ماسه، وزن شن و ماسه بر اساس حالت اشباع با سطح خشک، بازه مقدار اسلامپ و بزرگ‌ترین بعد درشت‌دانه و غیره به عنوان پیش فرض انتخاب می‌شوند. برخی از آنها با توجه به شرایط اقتصادی و جغرافیایی به طراح تحمیل می‌شود و در برخی دیگر انتخاب بر عهده طراح است. از این نکته می‌توان برای شکل‌دهی مسئله بهینه‌سازی استفاده نمود، به این معنی که تعدادی از این فرضیات را در محدودهٔ مجاز متغیر در نظر گرفت و اجازه داد تا برای رسیدن به هدف خاصی بهترین مقدار را یابند در حالی که بقیهٔ فرضیات مقدارشان ثابت است. بزرگترین بعد درشت‌دانه اغلب قابل انتخاب است و در این پژوهش نیز به عنوان متغیر اصلی در نظر گرفته شده و بر مبنای آن چهار متغیر تابع هدف تغییر می‌کنند. اجزای اصلی تشکیل دهنده بتن شامل آب، سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه هستند که با تغییر هر یک از آنها، مشخصه‌های طرح از جمله مقاومت فشاری، می‌توانند 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 عناصر اصلی مذکور 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 درشت‌دانه (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 قابل قبول 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 به‌طوری‌که 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 حملهٔ سولفات‌ها و کلرها، مقاومت مشخصهٔ 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 زیاد کاهش هزینهٔ 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 بدین‌صورت زیر فرموله نمود:

$$\text{Minimize Cost} = C_1 * X_1 + C_2 * X_2 + C_3 * X_3 + C_4 * X_4 \quad (۱)$$

که در آن C_1 هزینه واحد وزن آب، C_2 هزینه واحد وزن سیمان، C_3 هزینه واحد وزن ماسه و C_4 هزینه واحد وزن شن می‌باشند. همچنین در این رابطه و کلیهٔ روابطی که در ادامه بیان می‌شوند، X_i متغیرهای طراحی متناظر هستند. ضرایب هزینه قابل اصلاح می‌باشند و در زمان‌های مختلف بر اساس شرایط اقتصادی تعیین می‌گردند. 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.

۲-۳. قیود طراحی

به منظور تعریف مدل یک مسئلهٔ بهینه‌سازی، در صورت نیاز، محدودیت‌هایی که طرح را تحت تاثیر قرار می‌دهند را به عنوان قیود طراحی برای مدل در نظر می‌گیرند. پاسخ طرح زمانی قابل قبول می‌باشد که متغیرهای طراحی، تمامی قیود تعریف شده را برآورده کنند. بهینه‌سازی طرح اختلاط شامل متغیرهای ثانویه (مانند بزرگترین بعد سنگدانه) نیز می‌باشد که 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. جداول این آیین‌نامه همچنین محدودیت‌های اجرایی و دیگر حدود را نیز پوشش می‌دهد. به این ترتیب تعداد ۸ قید طراحی بصورت زیر تعریف می‌شوند:

اولین محدودیتی 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. نحوهٔ محاسبهٔ این رابطه در ادامه بیان خواهد شد اما به صورت کلی به شکل زیر است.

$$g_1 : \; -\overline{f_c} \le -f_c \qquad (۲)$$

در این رابطه $\overline{f_c}$ رابطه برازش شده مقاومت فشاری بتن بر اساس نتایج آزمایشگاهی و f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد انتظار برای بتن است. آیین‌نامه با در نظر گرفتن هردو جنبه مقاومت و کارآیی لازم برای نمونه‌ها، حداکثر نسبت آب به سیمان را تعیین می‌نماید. این نسبت توسط قید زیر کنترل می‌شود:

$$g_2 : \; X_1 - A * X_2 \le 0 \qquad (۳)$$

در نامعادله فوق ضریب A حداکثر نسبت آب به سیمان است که با توجه به مقاومت مورد نظر از مرجع [۱] به‌دست می‌آید. همچنین محدوده تقریبی وزن مخصوص بتن تازه از این مرجع قابل برداشت است. قیود زیر به منظور پوشش این بازه تعریف می‌شوند:

$$g_3 : \; X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \le C \qquad (۴)$$

$$g_4 : \; -X_1 - X_2 - X_3 - X_4 \le -D$$

که در آنها ثابت C مقدار حداکثر و ثابت D مقدار حداقل وزن مخصوص بتن تازه هستند که از مرجع [۱] به‌دست می‌آیند.

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

$$g_5 : -B_1 * X_1 - B_2 * X_2 - B_3 * X_3 - B_4 * X_4 \le -1 \qquad (۵)$$

که در آن ضرایب B_1 تا B_4 حجم یک کیلوگرم از متغیرهای متناظر هستند (یک تقسیم بر وزن مخصوص). بخش مهمی از بتن را خمیر بتن تشکیل می‌دهد که وظیفهٔ جلوگیری از وجود حفره بین دانه‌های شن و ایجاد یکپارچگی مخلوط و نیز عمکرد دانه‌ها را دارد. محدوده مقدار خمیر بتن، صریحاً 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:

$$g_6 : B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + B_4 * X_4 \le E \qquad (۶)$$

$$g_7 : -B_1 * X_1 - B_2 * X_2 - B_4 * X_4 \le -F$$

در این روابط ضرایب B_i مطابق با شرح مذکور در رابطه (۵) است. مقادیر E و F به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار خمیر بتن هستند. علاوه بر این قیود، محدودیت مقدار هر یک از متغیرهای طراحی از لحاظ اجرایی، به عنوان یک قید طراحی در نظر گرفته شده است:

$$g_8 : X_i^L \le X_i \le X_i^U \qquad (۷)$$

برای هر متغیر X_i، X_i^U کران بالا و X_i^L کران پایین 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 به‌کار 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 ارائهٔ یک الگوریتم موثر بهینه‌یابی برای مسئله طرح اختلاط بتن در تحقیق حاضر، برای قید شماره ۱ نیز رابطه‌ای صریح استخراج خواهد شد. در ادامه روشی موثر برای رابطه‌سازی و فرمول‌بندی قید محدودیت مقاومت فشاری بتن، تشریح می‌گردد.

۲-۳-۱. فرمول‌بندی قید مقاومت فشاری بتن

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد لازم است رابطه‌ای تنظیم شود که حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد نظر را به عنوان یک قید کنترل نماید. به این منظور و جهت افزایش دقت، رابطه غیرخطی زیر برای تخمین مقاومت فشاری، پیشنهاد می‌شود:

$$\overline{f_c} - \sum_i c_i * X_i \sum_i c_i' * X_i^2 + b = 0 \qquad (۸)$$

که در آن، c_i، c_i' و b ضرایب مجهولی می‌باشند که از پردازش داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند. تعیین رابطه مناسب برای مقاومت مشخصه به‌طوری‌که 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 (۸) هستند. همچنین تابع هدف، مقدار خطای ایجاد شده در معادله (۸) است که به صورت مجذور مجموع مربعات تفاضل مقاومت فشاری به‌دست آمده از معادله و مقاومت فشاری واقعی به‌دست آمده از آزمایش، مطابق با معادله زیر، در نظر گرفته می‌شود:

$$\text{Error} = \sqrt{\sum \left(\overline{f_c}\,(c_i, c_i', b) - f_{c_i}\right)^2} \qquad (۹)$$

که در آن، Error مقدار تابع هدف و $\overline{f_c}$ تابعی بر حسب ضرایب مجهول معادله است. همچنین f_{ci} مقاومت‌های فشاری حاصل از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی است. برای تعیین f_{ci} 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 برابر ۲/۶۴، چگالی ماسه برابر ۲/۶۶ 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 به‌کار رفته در معادله (۸)، مورد رجوع قرار گرفت. با حداقل‌سازی تابع هدف خطا، مطابق معادله (۹)، ضرایب بهینه محاسبه شدند و در نتیجه معادله نهایی زیر برای تابع مقاومت فشاری حاصل گردید:

$$\overline{f_c} = 0.793 * X_1 + 0.7 * X_2 + 0.102 * X_3 - 0.417 * X_4 - 0.003 * X_1^2 - 0.001 * X_2^2 - 0.0001 * X_3^2 + 0.0001 * X_4^2 + 345 \qquad (۱۰)$$

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 (۱۰) می‌تواند دقت مطلوبی را در محاسبه مقاومت فشاری واقعی طرح اختلاط، تضمین نماید.

۳. مطالعه عددی

۳-۱. طرح اختلاط بهینه برای مقاومت ۲۰مگاپاسکال

در بخش اول از مطالعه عددی، طرح اختلاط بهینه توسط روش پیشنهادی این مقاله و روش تئوری، برای مقاومت ۲۰ مگاپاسکال محاسبه می‌شود. در این مثال، فرض می‌شود که اسلامپ برابر ۵۰ میلی‌متر، مدول نرمی ماسه برابر ۲/۸، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مساوی با ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، 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. بهای 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 طرح اختلاط بتن به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی استاندارد به شرح زیر حاصل می‌شود:

$$\text{Minimize Cost} = 1 * X_1 + 60 * X_2 + 7 * X_3 + 8 * X_4$$

$$\text{S.t: } g_1 \equiv -\overline{f_c} \le -20$$
$$g_2 \equiv X_1 - 0.69 * X_2 \le 0$$
$$g_3 \equiv X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \le 2445$$
$$g_4 \equiv -X_1 - X_2 - X_3 - X_4 \le -2280$$
$$g_5 \equiv -0.001 * X_1 - 0.0003 * X_2 - 0.0004 * X_3 - 0.0004 * X_4 \le -1$$
$$g_6 \equiv 0.001 * X_1 + 0.0003 * X_2 + 0.0004 * X_4 \le 0.55$$
$$g_7 \equiv -0.001 * X1 - 0.0003 * X_2 - 0.0004 * X_4 \le -0.25$$
$$g_8 \equiv 154 \le X_1 \le 207$$
$$g_9 \equiv 736 \le X_3 \le 1184$$
$$0 \le X_2, X4$$

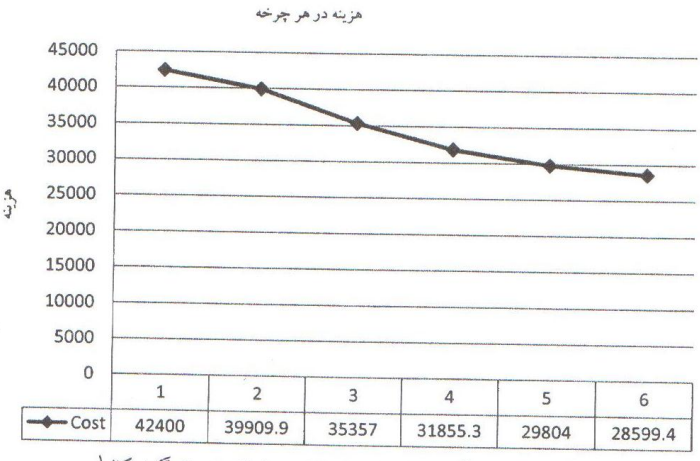
پس از فرمول‌بندی مسئله الگوریتم SQP برای حل آن به‌کار گرفته می‌شود. برای جزئیات این الگوریتم می‌توان به مرجع [۱۴] مراجعه نمود. طرح اختلاط بهینه محاسبه شده در این مطالعه و نتایج به‌دست آمده از جایگزینی رابطه‌ی تئوریک مرجع [۶] در همین مسئله، مقایسه گردید. نتایج به‌دست آمده از این مقایسه در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. در این جدول همچنین قیود فعال، یعنی قیودی که به صورت مساوی ارضا شده‌اند، در هر حالت ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قیود فعال و مقادیر تمامی اجزاء اصلی در هر دو حالت برابر می‌باشد. البته با استفاده از رابطه تئوریک[۶] مقاومت فشاری حاصل از ترکیب این اجزا، تقریباً برابر با ۲۰ مگاپاسکال و بر اساس رابطهٔ آزمایشگاهی (رابطه به‌دست آمده در این مطالعه) نزدیک به ۲۱ مگاپاسکال تخمین زده می‌شود.

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

نمونه Kg/ M²	آب Kg/ M²	سیمان Kg/ M²	شن Kg/ M²	ماسه Kg/M²	مقاومت فشاری (آزمایشگاهی) Kg/cm²	مقاومت فشاری (معادله ۱۰) Kg/cm²	خطا Kg/cm²	درصد خطا
۱	۱۵۰/۰۵	۲۱۷/۵۰۴	۹۵۰/۳۳۶	۱۰۶۲/۱۱	۱۹۲/۴	۲۰۱/۰۰۹۷	-۸/۶۰۹۷	۴/۲۸۳۲۲۶
۲	۱۶۱/۹۹۲	۲۳۴/۷۷۳	۶۸۳/۲۳۵	۱۳۰۰	۱۹۳/۹۵	۲۰۳/۹۹۹۲	-۱۰/۰۴۹	۵/۱۸۱۳۳۵
۳	۱۵۰	۲۱۷/۴۴۹	۱۲۶۸/۲۴	۷۴۴/۳۱۵	۲۰۰/۲	۲۰۵/۱۵۹۷	-۴/۹۵۹۷	۲/۴۷۷۳۷۳
۴	۱۵۰	۲۱۷/۴۲	۹۰۵/۷۹۸	۱۱۰۶/۷۷	۲۰۳/۵۵	۲۰۰/۸۵۷۴	۲/۶۹۲۶	۱/۳۲۲۸۲
۵	۱۵۰	۲۱۷/۴۱۸	۷۱۲/۵۸۲	۱۳۰۰	۲۱۱/۶	۲۰۱/۵۸۸۹	۱۰/۰۱۱۱	۴/۷۳۱۱۴۴
۶	۱۶۱/۹۹۲	۲۳۴/۷۷۳	۶۸۳/۲۳۵	۱۳۰۰	۲۰۳/۴۵	۲۰۳/۹۹۹۲	-۰/۵۴۹۲	۰/۲۶۹۹۴۳
۷	۱۶۶	۲۴۴	۱۱۰۰	۱۸۱۳	۱۷۲/۵۵	۱۷۴/۱۹۹۹	-۱/۶۴۹۹	۰/۹۵۶۱۸۷
۸	۱۶۶	۲۴۴	۱۰۹۸	۱۸۱۴	۱۷۶/۲۵	۱۷۴/۵۸۸۳	۱/۶۶۱۷	۰/۹۴۲۸۰۹
۹	۱۶۶	۲۴۴	۱۱۶۰	۸۴۷	۲۱۲/۲۵	۲۰۵/۲۴۱۷	۷/۰۰۸۳	۳/۳۰۱۹۰۸
۱۰	۱۵۰	۲۵۴	۹۴۶	۱۰۹۳	۲۰۹/۳۵	۲۰۳/۸۶۳۴	۵/۴۸۶۶	۲/۶۲۰۷۷۹
۱۱	۱۶۸	۲۰۰	۱۰۰۰	۱۰۳۶	۱۸۸/۸۵	۱۹۰/۴۵	-۱/۶	۰/۸۴۷۲۳۳
۱۲	۲۱۳	۳۶۱	۵۲۸	۱۱۲۴	۲۰۴/۸	۲۰۴/۵۲۳۴	۰/۲۷۶۶	۰/۱۳۵۰۵۹
۱۳	۱۶۸	۲۴۷	۱۰۰۸	۹۸۸	۲۰۷/۹	۲۰۴/۶۰۵۲	۳/۲۹۴۸	۱/۵۸۴۸
۱۴	۱۶۶	۳۳۲	۱۱۸۹	۷۲۰	۲۲۸/۵	۲۲۸/۹۶۹۲	-۰/۴۶۹۲	۰/۲۰۵۳۳۹
۱۵	۱۵۰	۳۰۰	۸۴۴	۹۹۷	۲۲۶	۲۲۸/۸۸۷	-۲/۸۸۷	۱/۲۷۷۴۳۴

جدول ۲- نتایج نهایی بهینه‌سازی

	قیود فعال	هزینه UNIT/M^3	مقاومت Kg/Cm^2	ماسه Kg/M^3	شن Kg/M^3	سیمان Kg/M^3	آب Kg/M^3
آزمایشگاهی	g_1, g_2, g_6	۲۸۵۹۹/۴	۲۰۸/۶	۸۲۲/۶	۱۱۶۲	۲۲۳/۲	۱۵۴
تئوری	g_1, g_2, g_6	۲۸۶۰۳/۱	۲۰۰/۷۴	۸۲۲/۶	۱۱۶۲	۲۲۳/۲	۱۵۴



شکل ۱- روند همگرایی برای طرح اختلاط بتن با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال[1]

جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی در مقاومت‌های مختلف

قیود فعال	نسبت آب به سیمان	هزینه UNIT/M^3	مقاومت Kg/Cm^2	ماسه Kg/M^3	شن Kg/M^3	سیمان Kg/M^3	آب Kg/M^3
نسبت آب به سیمان	۰/۶۳۴	۳۱۵۴۵/۹	۲۳۵	۶۷۶/۲	۱۱۸۴	۲۸۶	۱۸۱/۳
حجم	۰/۶۵	۳۱۳۵۰/۲	۲۲۵	۶۷۱	۱۱۸۴	۲۸۳/۳	۱۸۴/۱
مقاومت	۰/۶۷	۲۹۲۶۹/۱	۲۱۵	۷۷۷/۸	۱۱۸۴	۲۳۶/۶	۱۵۸/۵
نسبت آب به سیمان	۰/۶۷۵	۲۸۸۶۷/۳	۲۱۰	۸۱۸/۹	۱۱۶۱/۵	۲۲۸/۱	۱۵۴
	۰/۶۸	۲۸۷۷۶/۷	۲۰۵	۸۲۰/۱	۱۱۶۱/۷	۲۲۶/۵	۱۵۴
حجم	۰/۶۹	۲۸۵۹۹	۲۰۰	۸۲۲/۶	۱۱۶۲	۲۲۳/۲	۱۵۴
	۰/۷۰	۲۸۴۲۷/۱	۱۹۵	۸۲۵	۱۱۶۲/۲	۲۲۰	۱۵۴
خمیر بتن	۰/۷۱	۲۸۲۵۹/۷	۱۹۰	۸۲۷/۳	۱۱۶۲/۵	۲۱۶/۹	۱۵۴
	۰/۷۲	۲۸۰۹۶/۹	۱۸۵	۸۲۹/۶	۱۱۶۲/۸	۲۱۳/۹	۱۵۴

۱- در تمامی نمودارها واحد محور قائم، هزینه تولید یک مترمکعب بتن با در نظر گرفتن بهای واحد برای آب می‌باشد.

در شکل (۱) تغییرات تابع هدف در چرخه‌های طراحی ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود طراحی پس از ۶ چرخه همگرا (مقدار دامنه تغییرات تابع هدف کمتر از 10^{-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.

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 بهای بالای سیمان تمایل به کاهش آن دارد و به منظور تأمین محدودیت خمیر بتن، مقدار ماسه را کاهش می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود این الگوریتم برای رسیدن به کمترین هزینه، مقاومت را تا رسیدن به مقداری نزدیک به حداقل مقاومت مجاز (مقاومت فشاری مورد نظر برابر با ۲۰ مگاپاسکال) کاهش می‌دهد. همچنین برای رسیدن به این مقاومت و با توجه به دیگر محدودیت‌ها، مقداری نزدیک به حداکثر قید نهم (محدودیت مقدار متغیرها) را برای شن پیشنهاد نتیجه می‌دهد. با توجه به هزینه سیمان، همانطور که قابل انتظار است از کمترین نسبت آب به سیمان (۰/۶۹)، کمترین مقدار سیمان و باطبع آن کمترین مقدار آب به‌دست آمده است.

نتایج بررسی تاثیر مقاومت در روند بهینه‌یابی در جدول (۳) خلاصه شده است. جدول (۱) نشان می‌دهد که با توجه به اینکه رابطه از آزمایش‌های محدوده ۱۷۰ تا ۲۳۵ به‌دست آمده است، پس برای این محدوده صادق است. حال با تغییر مقاومت در این بازه، پروسه بهینه‌سازی تکرار می‌شود. البته با توجه به این نکته که نسبت آب به سیمان، بر اساس جداول ACI، وابسته به مقاومت است و برای هر مقاومت مشخص، این قید توسط درونیابی این جداول تصحیح شده است، قیود فعال نیز ذکر شده‌اند. همانطور که از نتایج موجود در جدول مشاهده می‌شود، با کاهش مقاومت، هزینه کاهش می‌یابد. اما این نکته قابل ملاحظه است که برای مقاومت فشاری کمتر از ۲۱۵ یکی از قیود فعال تغییر می‌کند، به این معنی که برای این مقادیر رابطه برازش شده، دیگر در حالت تساوی نیست. این مسئله دلیل برابری دو حالت تئوری و آزمایشگاهی است که در جدول (۲) آمده است. اما از این نکته نتیجه گرفت که در مقاومت‌های نسبتاً کم، اگر نسبت آب به سیمان و مقدار خمیر بتن که نیاز به یک دید مهندسی دارد پوشش داده شود، می‌توان به مقاومت لازم رسید. البته بتن حاصل ممکن است از نظر هزینه بهینه نباشد.

۳-۲. طرح اختلاط بهینه برای مقاومت ۲۵مگاپاسکال

در این بخش مسئلهٔ طرح اختلاط بهینه برای رسیدن به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال به‌دست آمده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. هدف از حل این مسئله، امکان‌سنجی استفاده از رابطه پیشنهادی (قید۱)، برای مقاومتی خارج از محدوده مرجع آن رابطه است. به این منظور مقاومت ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه طرح اختلاط بهینه برای مقاومت ۲۵ مگاپاسکال با توجه به فرضیات مسئله گذشته، تنها لازم است با توجه به توضیحات بیان شده در قسمت (۲-۳)، قیود اول و دوم به صورت زیر اصلاح شوند:

مشاهده می‌شود برای این مقاومت، قید مقاومت جزء قیود فعال است و همچنین تابع هزینه افزایش یافته است. با توجه به تمایل تابع هدف به کاهش هزینه، فعال شدن یکی از قیود حداقل حجم یا حداقل وزن، منطقی به نظر می‌رسد. در شکل (۲) تغییرات مقادیر تابع هزینه در چرخه‌های مختلف طراحی برای مقاومت ۲۵مگاپاسکال نشان داده شده است. در صورت استفاده از نقطه اولیه مشابه مثال قبل، همگرایی آن در ۷چرخه حاصل می‌شود.

$$g_1 \equiv -\overline{f_c} \leq -25$$

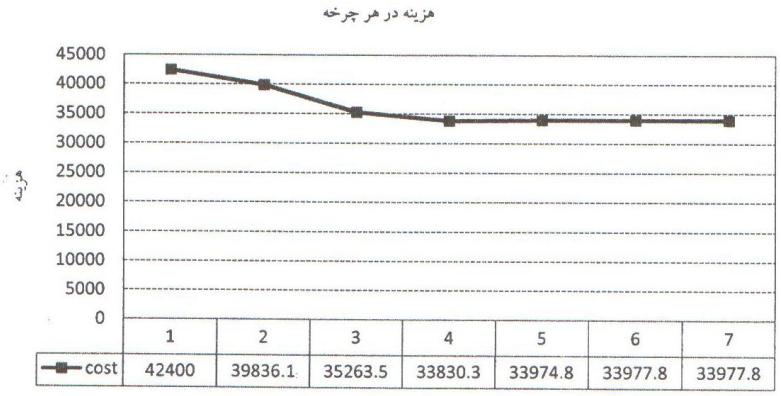
$$g_2 \equiv X_1 - 0.61 * X_2 \leq 0$$

در جدول (۴) نتایج دو مورد بهینه‌سازی به روش ارائه شده در این مطالعه، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

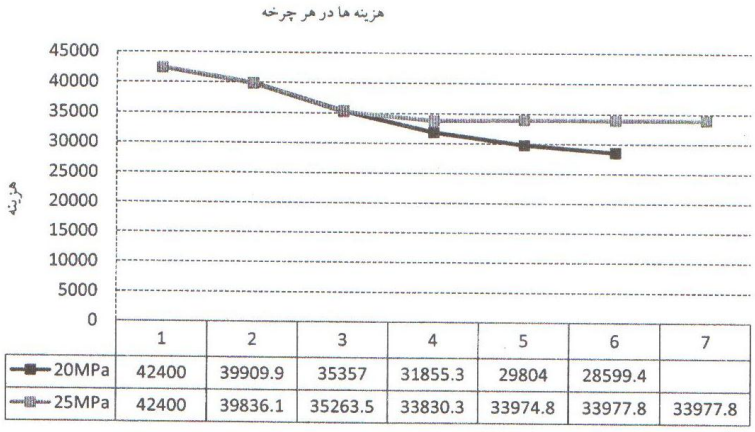
با توجه به نقطه شروع یکسان برای دو نمونه مطالعه موردی، روند همگرایی و مقدار هزینه در هر چرخه، جهت مقایسه در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که طرح بهینه در مقاومت ۲۵ مگاپاسکال دچار ۱۵/۹ درصد افزایش هزینه نسبت به مقاومت ۲۰ مگاپاسکال شده است.

جدول ۴- نتایج نهایی بهینه‌سازی

نمونه	آب Kg/M^3	سیمان Kg/M^3	شن Kg/M^3	ماسه Kg/M^3	مقاومت Kg/cm^2	هزینه $UNIT/M^3$	قیود فعال
۲۰مگاپاسکال	۱۵۴	۲۲۳/۲	۱۱۶۲	۸۲۲/۶	۲۰۸/۶	۲۸۵۹۹/۴	g_2, g_5, g_6
۲۵ مگاپاسکال	۲۰۶/۹	۳۳۹/۲	۱۱۸۴	۵۶۴/۱	۲۵۰	۳۳۹۷۷/۸	g_1, g_2, g_6



شکل ۲- روند همگرایی برای طرح اختلاط بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال



شکل ۳- مقایسه روند همگرایی دو طرح اختلاط بتن با مقاومت فشاری ۲۰ و ۲۵ مگاپاسکال

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق طرح اختلاط بتن با دیدگاه جدیدی مورد بررسی قرار گرفت و یک روش جدید برای طرح اختلاط بتن با مقاومت معمولی براساس اصول بهینه‌سازی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی توسعه داده شد. به این منظور ابتدا طرح اختلاط بتن به صورت یک مسئلهٔ بهینه‌سازی رابطه‌سازی شد، که هدف از آن کاهش هزینهٔ اجزاء اصلی بتن برای مخلوط یک واحد حجم تحت شرایطی که مقاومت مشخصه مورد نظر را تأمین کند، بود. چهار متغیر طراحی شامل مقادیر وزنی چهار ماده آب، سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه در نظر گرفته شدند و تابع هدف بهینه‌سازی

هزینه ساخت یک متر مکعب بتن بر اساس آنها تعریف گردید. 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 به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی برای حل مسئله طرح اختلاط، نتایج طرح اختلاط بهینه در دو حالت تئوری و آزمایشگاهی (برای مقاومت ۲۰ و ۲۵ مگاپاسکال) محاسبه شدند. نشان داده شد که روش توسعه‌یافته در تحقیق علاوه بر خودکار نمودن پروسه طرح اختلاط توانایی حداقل نمودن هزینه‌های بتن‌ریزی را دارد.

نتایج به‌دست آمده از مطالعات موردی نشان دادند که هزینه اجزاء تشکیل دهنده بتن برای رسیدن به مقاومت ۲۰ مگاپاسکال در حالت عملی برابر مقدار مشابه در حالت تئوری است. همچنین بررسی نتایج در هر چرخه نشان می‌دهد برای تأمین مقاومت لازم برای بتن می‌توان درشت‌دانه را افزایش داد تا به حداکثر مجاز برسد، که با توجه به مقاومت نوع مصالح 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 اجزا برای تأمین مقاومت در عمل باقی نمی‌ماند و رفتار بتن در آزمایشگاه متفاوت است.

۵. مراجع

[1]. ACI Standard 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1996.

[2]. M. Simon, J. Lagergren, E. S. Snyder, A. Kenneth "Concrete Mixture Optimization Using Statistical Mixture Design Methods" International Symposium on High Performance Concrete. 230-244, October, 1997.

[3]. Y. Xi, B. Shing, Z. Xie, "Development of Optimal Concrete Mix Designs for Bridge Decks," The Colorado Department of Transportation. Report No. CDOT-DTD-R-2001-11.

[4]. J. Cannon, P. Murti, G.R. Krishna. "Concrete Optimized Mix Proportioning (COMP)" Cement and Concrete Research. 4, 353-366, 1971.

[5]. Yeh, IC. "Computer-Aided Design for Optimum Concrete Mixtures" Cement & Concrete Composites. 29, 193–202, 2007.

[۶]. حبیبی، علیرضا. یوسفی، مهدی. "بهینه کردن اجزاء اصلی بتن با استفاده از اصول بهینه سازی" اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها. ۱۳۸۸.

[7]. A.Ghezal, and K. H. Khayat, "Optimizing Self-Consolidating Concrete with Limestone Filler by Using Statistical Factorial Design Methods," Materials Journal. 99, 3, 264-272, 2009.

8. Y.S. Yoon, J.-H. Kim, Ch.-H. Lim, "Genetic Algorithm in Mix Proportioning of High-Performance Concrete" Cement and Concrete Research. 34, 409–420, 2004.

[۹]. علی اکبر رمضانیاپور، علی حسن خانی." طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی" ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران. ۱۳۸۲.

[۱۰]. منوچهر بهرویان، مرتضی زارعی. "بهینه‌سازی بتن پلیمری،" فصلنامه انجمن بتن ایران، ۲۰ (۱۳۸۳). ۲۷-۳۱. ۱۳۸۳.

[۱۱]. داود. مستوفی نژاد، محمد. رئیسی، "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.

[12]. E.Ozbay, A. Oztas, A. Baykasoglu, H. Ozbebek, "Investigating Mix Proportions of High Strength Self Compacting Concrete by Using Taguchi Method" Construction and Building Materials. 23 (2009), 694–702, 2009.

[13]. T.M. Murali, S. Kandasamy, "Mix Proportioning of High Performance Self-Compacting Concrete Using Response Surface Methodology," The Open Civil Engineering Journal, 3, 93-97. 2009.

[14]. J.S. Arora, "Introduction to Optimum Design." McGraw-Hill Book Company, 1989.

Concrete mix design using optimization principles and based on experimental results

A. Habibi *
Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Kurdistan
H. Safaari
MS. Student, University of Kurdistan
(Received: 2010/12/15, Accepted: 2011/4/25)

Abstract
Existing resources limitation and abundant use of concrete has made the necessity of objected employment of funds especially for mass production of this type of material. Concrete mix design is one of the most important criteria that should be changed in order to optimal and mass production of concrete. The objective of present research is to present a new method for concrete mix design using the principles of optimization. Practicability of this work is very important because it is based on theoretical and experimental studies considering conditions of production of concrete in Iran. Optimization model of the concrete mix design is first developed accounting for effects of experimental results. Then using an optimization algorithm, optimal concrete mix design is obtained for the concrete with the strength under consideration. Presented process and model can be developed for similar problems. Case study's results show that optimal concrete mix design is obtained while maximum dimension of coarse aggregate and consequently amount of coarse aggregate is increased. It is shown that the developed method is able to minimize costs of casting concrete in addition to making the automatic mix design process.

Keywords: Mix design, Concrete, Optimization, Cost reduction of cement in conventional and logical amounts have been applied which provide bridging forces across cracks and thus prevent them from growing.

* Corresponding author: ar.habibi@uok.ac.ir