

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین بر اساس نتایج آزمایشگاهی

علیرضا حبیبی^{۱*}، یاسر رحمانی^۲، سرکوت سعیدپور^۳

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه شاهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه کردستان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه کردستان

*ar.habibi@shahed.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۰/۵]

تاریخ پذیرش: [۹۶/۶/۲۷]

چکیده

بتن علاوه بر دارا بودن خواص سازه‌ای مناسب، یکی از مناسب‌ترین و پر کاربردترین مصالح برای ساخت حفاظ تابش‌های هسته‌ای نوترون و گاما است. در این میان استفاده از بتن سنگین به جای بتن معمولی باعث کاهش ضخامت عضو محافظتی به میزان قابل توجه خواهد شد. با توجه به حجم زیاد بتن ریزی در نیروگاه-های اتمی، بهینه‌سازی طرح اختلاط این نوع بتن می‌تواند تا حد زیادی منجر به کاهش هزینه ساخت شود، هدف اصلی از این پژوهش توسعه یک روش طرح اختلاط بتن سنگین بر اساس اصول بهینه‌سازی است. بدین منظور ابتدا مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین تعریف می‌شود، سپس با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی طرح اختلاط بهینه برای بتن با مقاومت مورد نظر بدست می‌آید. نتایج عددی نشان می‌دهد که با کاهش مقادیر سنگدانه و سیمان و افزایش مقدار ریزدانه در طرح اختلاط به صورت همزمان، مقدار هزینه طرح اختلاط کاهش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: طرح اختلاط، بهینه‌سازی، بتن سنگین

۱- مقدمه

هسته‌ای می‌باشد تا از آثار زیان آور زیست‌محیطی آنها جلوگیری شود. بتن علاوه بر دارا بودن خواص سازه‌ای مناسب، با داشتن مزایایی مانند سهولت در ساخت، هزینه کم برای ساخت، تعمیر و نگهداری، یکی از مناسب‌ترین و پر کاربردترین مصالح برای ساخت حفاظ تابش‌های هسته‌ای نوترون و گاما است که در این میان استفاده از بتن سنگین به جای بتن معمولی باعث کاهش ضخامت عضو محافظتی به میزان قابل توجه خواهد شد و بطور ویژه به عنوان سپر محافظ در مقابل تشعشع به کار می‌رود [2]. هر چند که سپرهای محافظ در مقابل تشعشع کاربرد اصلی بتن‌های

طرح اختلاط بتن به معنی فرآیند تعیین نسبت‌های ترکیب اجزای سازنده بتن با توجه به ویژگی‌های موردنظر مانند مقاومت، دوام و پیوستگی، با یک ترکیب منظم است [1]. بتن نسبت به دیگر مصالح سازه‌ای از دیدگاه‌های گوناگون از جمله قابلیت کاهش هزینه تولید دارای مزیت است، در این میان بتن‌های خاص و ویژگی‌های منحصر به فرد هر نوع بتن خاص به صورت مجزا منجر به کاربرد و استفاده از بتن در سازه‌های مختلف شده است. یکی از مهمترین مسائل در کاربرد فن‌آوری هسته‌ای، حفاظت در برابر تابش‌های

دهنده بتن غلتکی روی خواص مقاومتی آن پرداختند و سپس شرایط سنگدانه در تعیین نسبت‌های بهینه برای دستیابی به مقاومت بیشینه را بررسی نمودند. بهرویان و زارعی در سال ۲۰۰۴ بهینه‌سازی بتن‌های پلیمری را انجام دادند [8]. آنها در این پژوهش از یکی از روش‌های بهینه‌سازی بتن پلیمری که در انستیتوی ملی استاندارد و تکنولوژی ایالات متحده آمده است، استفاده نمودند. در پژوهش آنها، دانسیته، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مورد مطالعه قرار گرفت که این مطالعه روی دو نوع بتن پلیمری اپوکسی و بتن‌های پلیمری پلی‌استری انجام شد. ازبای و همکارانش در سال ۲۰۰۸، پژوهشی را روی نسبت‌های اختلاط بتن خودتراکم با مقاومت بالا انجام دادند [9]. آنها در این پژوهش از یک روش تجربی برای طراحی بهینه استفاده کردند و در یک رتبه‌بندی، میزان و اثر هر یک از نسبت‌ها را روی بتن‌های خود تراکم با مقاومت بالا در حالت‌های تازه و سخت شده نشان دادند. حبیبی و همکارانش در سال ۱۳۹۰ یک روش جدید برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن با مقاومت معمولی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و برنامه‌ریزی درجه دوم توسعه دادند [10]. به این منظور در مدل بهینه‌سازی، محدودیت مقاومت فشاری بتن به عنوان یک قید اصلی، براساس نتایج آزمایشگاهی فرمول‌بندی شد و در این پژوهش نشان داده شد که روش به کار رفته، ضمن ارضا نمودن محدودیت مقاومت و سایر محدودیت‌های طرح، قابلیت کاهش هزینه ساخت بتن را به طور مؤثری دارد. در سال ۱۳۹۱ اسماعیل‌نیا عمران و فریدی [11] طرح اختلاط بتن خودتراکم را با استفاده از روش تاگوچی بدست آوردند که در آن با استفاده از روش مذکور، ۲۷ طرح اختلاط ارائه شد با بررسی خواص رئولوژیکی و بدست آوردن مقاومت فشاری ۷ روزه این طرح اختلاط‌ها، طرح بهینه بدست آمد. جواهرزاده و گنجویان به بررسی بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن خود تراکم با الگوریتم‌های هوشمند در سال ۱۳۹۴ پرداختند و یک ایده برای چگونگی استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه کردند [12]. اسکندری و پاکزاد در رابطه با تعیین طرح اختلاط بهینه بتن خود تراکم با استفاده از الگوریتم سیمپلکس، و بدست آوردن مقادیر مناسب در طرح اختلاط در سال ۲۰۱۳ پژوهش‌هایی را انجام دادند [13]. با توجه به پژوهش‌های انجام شده با وجود

سنگین هستند، لیکن در ساخت وزنه‌های تعادلی (بتن‌های وزنی) و یا در مواردی که نیاز به افزایش بار مرده سازه، بدون افزایش حجم وجود داشته باشد نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که بحث از بتن سنگین است، منظور بتنی است که اساسا دارای وزن مخصوص بزرگتری نسبت به بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های معمولی است و معمولا با استفاده از سنگ‌دانه‌های سنگین تهیه شده که دارای وزن مخصوصی بیش از ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است، که بر اساس نوع و اندازه سنگدانه مصرفی و شیوه تراکم و تخلیه، می‌تواند وزن مخصوصی بیش از ۶۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نیز داشته باشد [3]. با توجه به حجم زیاد بتن‌ریزی در نیروگاه‌ها اهمیت پژوهش در موضوع تولید و استفاده بهینه از بتن سنگین افزایش یافت، برای بتن‌های متعارف، انجمن بتن امریکا (ACI) [4] 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 چگالی زیاد نیز روشی برای بهینه کردن مخلوط ارائه نشده است با وجود سابقه زیاد طراحی بهینه در مورد سازه‌ها، قدمت بهینه‌سازی در مورد طرح اختلاط بتن زیاد دور نیست، اولین کار جدی در این زمینه توسط ماریا و همکارانش در سال ۱۹۹۷ انجام شد [5]. این پژوهشگران یک آزمایش اختلاط آماری را برای طرح اختلاط بتن‌های با کارایی بالا انجام دادند، آنها برای پیدا کردن رابطه بین مقاومت فشاری و متغیرهای طراحی از چند جمله‌ای‌های شرف درجه ۲ استفاده کردند ژری و همکارانش در سال ۲۰۰۱ چهار آزمایش مختلف به منظور توصیف خواص مکانیکی و دوام بتن انجام دادند [6]. آزمایش‌های انجام شده توسط آنها شامل آزمایش مقاومت مشخصه، مقاومت در برابر ترک، نفوذپذیری کلرید در زمان‌های مشخص روی همه نمونه‌ها و آزمایش انقباض بتن روی برخی نمونه‌ها بود. در این پژوهش، با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، گزارشی در ارتباط با توسعه طرح اختلاط بهینه بتن برای عرشه‌های پل منتشر شد. رمضانیان پور و حسن‌خانی در سال ۲۰۰۳ نسبت بهینه اجزای تشکیل دهنده در طرح اختلاط بتن غلتکی را تعیین نمودند [7]. آنها نخست به بررسی تأثیر مصالح تشکیل-

مشخصه برآزش داده و سپس با فرمول‌بندی سایر محدودیت‌ها متغیرها و نسبت‌های بهینه شده برای طرح اختلاط تعیین می‌شود. بنابراین در این پژوهش، ابتدا برای طرح اختلاط بتن سنگین یک مدل بهینه‌سازی ایجاد می‌شود و سپس با استفاده از یک الگوریتم به حل آن پرداخته می‌شود. 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) است. با این تعریف، یک مسأله بهینه‌سازی را در حالت استاندارد می‌توان مطابق روابط زیر فرموله نمود:

$$\text{Min } f(x) \quad (1)$$

Subject to :

$$g_i(x) \leq 0 \quad \text{و} \quad i = 1 \dots m$$

که در آن f تابع هدف، x بردار متغیرهای طراحی، m تعداد قیود طراحی نامساوی است. در ادامه به تشریح اجزای مورد نیاز در مدل بهینه طرح اختلاط بتن سنگین پرداخته می‌شود.

۱-۲. متغیرهای طراحی

اولین گام مهم در یک مدل بهینه، مشخص کردن متغیرهای طراحی سیستم است. اگر متغیرهای مناسب انتخاب نشوند، رابطه سازی یا غلط و یا غیرممکن است [14]. به پارامترهایی که برای تشریح طراحی یک سیستم انتخاب می‌شوند، متغیرهای طراحی می‌گویند. اگر متغیرهای مناسب انتخاب نشوند، رابطه سازی یا اشتباه و یا غیرممکن است. در مرحله اولیه رابطه‌سازی، تمام گزینه‌ها برای مشخص کردن متغیرهای طراحی باید مورد مطالعه قرار گیرند و تمامی متغیرهای طراحی باید تا حد امکان از هم مستقل باشند. با توجه به اینکه در طرح اختلاط بتن سنگین، تعیین مقادیر آب، سیمان، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه برای تأمین ویژگی‌های مکانیکی بتن مورد نظر است، در این پژوهش، با توجه به اینکه در طرح اختلاط بتن سنگین از سنگ‌دانه‌های متفاوتی با چگالی زیاد می‌توان استفاده کرد، از ۵ متغیر در مدل سازی طرح بهینه استفاده می‌شود. مقادیر وزن سنگ‌دانه (X_1) ، وزن ریزدانه (X_2) ، وزن آب مصرفی (X_3) ، وزن سیمان (X_4) و چگالی سنگ‌دانه مورد

اینکه پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه روش‌های سستی طرح اختلاط بتن‌های معمولی و بتن‌های خاص انجام شده، اما تحقیقات محدودی در زمینه روش‌های بهینه کردن طرح اختلاط بتن‌های خاص از جمله بتن‌های سنگین انجام گرفته است. همچنین پژوهش‌های قبلی در مورد بهینه سازی طرح اختلاط نشان می‌دهد که بهینه سازی طرح اختلاط بتن‌های سنگین تاکنون انجام نگرفته است. هدف این پژوهش ارائه یک روش جدید برای طرح اختلاط بتن سنگین بر مبنای نتایج آزمایشگاهی است، به این منظور برای طرح اختلاط یک مدل بهینه سازی توسعه داده می‌شود و متغیرهای طراحی، تابع هدف، قیود طراحی تعریف می‌شوند سپس محدودیت مقاومت فشاری بتن سنگین به عنوان یک قید اصلی، بر اساس نتایج آزمایشگاهی با توسعه یک مدل تحلیلی فرمول‌بندی می‌شود. برای حل مسئله بهینه سازی طرح اختلاط از الگوریتم برنامه ریزی درجه دوم متوالی^۱ استفاده می‌شود. برای درستی آزمایشی و نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، چند نمونه طرح اختلاط بهینه با مقاومت‌های مختلف ارائه می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، ضمن تأمین نمودن محدودیت مقاومت فشاری و سایر محدودیت‌های طرح، قابلیت کاهش هزینه ساخت بتن را بطور موثری دارد.

۲. روش تحقیق

بتن سنگین شامل اجزای مختلفی است، که با بهینه‌سازی طرح اختلاط آن می‌توان با استفاده از بهترین نسبت‌های اختلاط اجزا به ویژگی‌های مطلوب دست یافت. استفاده از روش‌های آیین‌نامه‌ای برای محاسبه طرح اختلاط، وقتگیر و پرهزینه است و لازم است حتماً شرایط و فرضیات آیین‌نامه را برای تمام اجزای تشکیل‌دهنده بتن رعایت کرد، در این پژوهش، طرح اختلاط بر مبنای روابط ریاضی و براساس اصول بهینه‌سازی فرمول‌بندی می‌شود، به این منظور متغیرهای مختلفی در نظر گرفته می‌شود که با هدف مسأله مرتبط باشد، که تابع هدف هزینه ساخت بتن سنگین است. محدودیت تأمین مقاومت فشاری به عنوان محدودیت اصلی در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای تصمیم تعیین شده و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی یک رابطه براساس متغیرها برای مقاومت

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 درشت دانه و رطوبت‌ها از این جمله‌اند. طراح در انتخاب برخی از آنها مجبور به قبول مقدار و در بعضی دیگر دارای محدوده اختیار است که 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 اجزا اصلی بتن است که به صورت مشخص مستقیماً 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 بر مبنای آن ۵ متغیر تابع هدف تغییر می‌کنند در ابتدا با توجه به بزرگترین بعد درشت‌دانه و مقدار اسلامپ فرض شده مقدار آب در واحد حجم بتن بدست می‌آید.

اولین قید طراحی مورد نظر در طرح اختلاط بتن سنگین قید کمینه مقاومت فشاری است که باید تضمین کند مقاومت نمونه طرح اختلاط از یک مقدار مشخص کمتر نشود. به منظور اعمال این قید نیاز است که مقاومت فشاری نمونه را براساس متغیرهای طراحی فرمول‌بندی نمود. این محدودیت را می‌توان مطابق رابطه زیر نوشت:

$$\overline{f_c} \leq -f_{c1} g \quad (3)$$

که در آن، $\overline{f_c}$ رابطه برآزش داده شده از نتایج آزمایشگاهی و f_c حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد انتظار برای بتن حاصل است.

قید دوم، بیشینه نسبت آب به سیمان است، که با توجه به ضابطه آیین‌نامه بیشترین نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶ است و بر اساس رابطه زیر کنترل می‌شود.

$$g_2 = \left(\frac{x_3}{x_4} \right) - \left(\frac{W_w}{W_c} \right)_{max} \leq 0 \quad (4)$$

استفاده (X5)، متغیرهای طراحی برای تشکیل یک متر مکعب بتن تازه در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲. تابع هدف

تابع هدف در مسائل بهینه‌سازی طراحی به عنوان معیاری برای تشخیص طرح مطلوب (بهینه) است. این تابع برحسب متغیرهای طراحی و بعضی پارامترهای ثابت تعریف می‌شود که هدف از حل یک مسئله بهینه‌سازی، کمینه یا بهینه کردن آن است. با توجه به انتظار طراح از سازه بتنی مورد نظر می‌توان توابع هدف متعددی را از جمله اسلامپ، مقاومت مشخصه فشاری و وزن مخصوص برای مدل بهینه‌سازی تعیین کرد. در این پژوهش با توجه به حجم زیاد بتن ریزی با بتن سنگین در نیروگاه‌های اتمی، هزینه ساخت این نوع بتن خاص دارای نقش مهمی در کاهش هزینه کلی این نوع سازه‌ها دارد. به همین دلیل هزینه ساخت یک واحد حجم بتن به عنوان تابع هدف در این پژوهش در نظر گرفته می‌شود که باید حداقل شود. به این ترتیب تابع هدف مسئله طرح اختلاط را می‌توان مطابق رابطه زیر فرمول‌بندی نمود.

$$f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 \quad (2)$$

که در آن c_1 هزینه واحد وزن سنگ‌دانه با توجه به سنگ دانه مورد استفاده، c_2 هزینه واحد وزن ریزدانه، c_3 هزینه واحد وزن آب مورد استفاده و c_4 هزینه واحد وزن سیمان مصرفی است، که با توجه به وابسته بودن تابع هدف به این ضرایب مقدار هزینه در شرایط مختلف متفاوت خواهد بود.

۲-۳. قیود طراحی

به طور کلی تمامی محدودیت‌هایی را که روی طرح می‌گذارند جمعاً قیود می‌نامند. هر قید باید توسط یک یا چند متغیر طراحی متاثر شود در چنین صورتی است که آنها معنی دارند و روی طرح تاثیر می‌گذارند. [14]. طرح مخلوط بتن‌های سنگین که به صورت معمول و سنتی ساخته و ریخته می‌شوند، تفاوت چندانی با طرح مخلوط بتن با وزن مخصوص معمولی ندارند [15]. همچنین در آیین‌نامه ACI اشاره شده است که روند طراحی، اختلاط، حمل و بتن‌ریزی بتن سنگین مشابه با بتن‌های معمولی است [2]. در طرح اختلاط بتن براساس روش پیشنهادی آیین‌نامه ACI-211

که در این رابطه مقادیر x_i^l و x_i^u به ترتیب مربوط به کران بالا و کران پایین هر یک از متغیرهای طراحی است.

با توجه به فرمول‌بندی قیدهای اشاره شده، مشاهده می‌شود که به جز قید شماره ۱ (مقاومت فشاری) همه قیود توابع صریحی از متغیرهای طراحی است. برای برقراری رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن و متغیرهای طراحی برای طرح اختلاط بتن، یک روش موثر پیشنهاد می‌شود که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

۱-۳-۲. فرمول‌بندی مقاومت فشاری بتن سنگین

در این پژوهش، بر اساس بررسی‌ها و برازش‌های صورت گرفته، معادله زیر برای تخمین مقاومت مشخصه بتن سنگین پیشنهاد می‌شود.

$$\overline{f_c} = c_1 + c_2 \cos(x_1) + c_3 x_2 - c_4 \frac{x_3}{x_4} + c_5 x_4 - c_6 x_5 \quad (11)$$

که در آن ضرایب ثابت c_i از روش خطای کمینه مجموع مربعات بدست می‌آید. به این منظور از نتایج آزمایشگاهی بتن سنگین که در جدول (۱) خلاصه شده، استفاده می‌شود. پس از برازش بهترین منحنی و به کارگیری روش خطای کمینه مجموع مربعات ضرایب ثابت به شرح زیر خلاصه شده‌اند:

$$(c_1 = 59.91, c_2 = 1.064, c_3 = 0.0294, c_4 = 83.78, c_5 = 0.0074, c_6 = 4.82) \quad (12)$$

ضریب همبستگی مربوط به رابطه (۱) برابر 0.973 است که نشانگر دقت مطلوب رابطه پیشنهادی و مناسب بودن آن است. مقدار خطای حاصل از معادله فوق در تخمین مقاومت فشاری هر طرح اختلاط محاسبه شده و در جدول (۱) خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه خطای ایجاد شده مربوط به آزمایش شماره ۵ که برابر با $2/42$ درصد است. در نتیجه می‌توان گفت که استفاده از رابطه (۱۱) دقت خوبی را در محاسبه مقاومت فشاری طرح اختلاط تضمین می‌نماید.

به منظور انجام عمل هیدراسیون سیمان به صورت کامل و با توجه به اینکه از روان‌کننده در طرح اختلاط استفاده نمی‌شود، از یک مقدار حداقل نسبت آب به سیمان، به عنوان محدودیت سوم مطابق رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$g_3 = -\left(\frac{x_3}{x_4}\right) + \left(\frac{W_w}{W_c}\right)_{min} \leq 0 \quad (5)$$

براساس آیین‌نامه یک مقدار حداقل برای وزن مخصوص بتن سنگین در نظر گرفته می‌شود که باید مقدار وزن مخصوص از 2400 کیلوگرم بر مترمکعب بیشتر باشد. این محدودیت به عنوان قید چهارم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g_4 = x_1 - x_2 - x_3 - x_3 \leq -\gamma \quad (6)$$

بخش مهمی از بتن را خمیر بتن تشکیل می‌دهد که وظیفه جلوگیری از وجود حفره بین دانه‌های شن و ایجاد یکپارچگی در عملکرد دانه‌ها را دارد. محدوده مقدار خمیر بتن صریحاً در آیین‌نامه ذکر نشده است اما برای مجموع حجم مصالح تشکیل دهنده خمیر بتن می‌توان قیود زیر را تعریف نمود:

$$g_5 = A_2 * X_2 + A_3 * X_3 + A_4 * X_4 \leq E \quad (7)$$

$$g_6 = -A_2 * X_2 - A_3 * X_3 - A_4 * X_4 \leq -F \quad (8)$$

که در این روابط ضرایب A_i حجم یک کیلوگرم از متغیرهای متناظر است، (یک تقسیم بر وزن مخصوص) و مقادیر E و F به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه مقدار خمیر بتن هستند.

چون مقادیر طرح اختلاط مربوط به حجم یک متر مکعب بتن است، قید هفتم را به محدودیت مجموع حجم مقادیر به یک اختصاص می‌دهیم.

$$g_7 = -A_1 * X_1 - A_2 * X_2 - A_3 * X_3 - A_4 * X_4 \leq -1 \quad (9)$$

علاوه بر این قیود، کران پایین و بالای مقادیر متغیرهای طراحی را نیز می‌توان مطابق رابطه ذیل اعمال کرد:

$$g_8 = x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (10)$$

۳. حل مساله طرح اختلاط

۱۵۵۰، ۱۸۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با توجه به مبحث ششم آیین‌نامه ساختمان در نظر گرفته شده است. بر اساس مدل پیشنهادی تحقیق، مسئله طرح اختلاط نمونه اول را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{Min } f(x) = 110x_1 + 16x_2 + 10x_3 + 90x_4 \quad (12)$$

$$\text{Subject to : } = \bar{f}_c \leq -26 \text{ }_1 g$$

$$g_2 = \left(\frac{x_3}{x_4}\right) - 0.6 \leq 0$$

$$g_3 = -\left(\frac{x_3}{x_4}\right) + 0.3 \leq 0$$

$$g_4 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 \leq -2400$$

$$g_5 = 0.0006X_2 + 0.001X_3 + 0.00055X_4 \leq 0.55$$

$$g_6 = -0.0006X_2 - 0.001X_3 - 0.00055X_4 \leq -0.25$$

$$g_7 = -0.00033x_1 - 0.0006X_2 - 0.001X_3 - 0.00055X_4 \leq -1$$

$$1000 \leq x_1 \leq 2000, \quad 0 \leq x_2$$

$$150 \leq x_3 \leq 400, \quad 300 \leq x_4 \leq 700$$

$$4 \leq x_5 \leq 4.6$$

در این بخش، به حل مسأله بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته و مدل شده پرداخته می‌شود. حل مؤثر و دقیق این مسأله نه تنها به اندازه مسأله از نظر تعداد قیود و متغیرهای طراحی وابسته است، بلکه به ویژگی تابع هدف و قیود نیز بستگی دارد. در این پژوهش برای حل مسئله بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین از روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی استفاده می‌شود که جزئیات آن در مرجع [14] آمده است. در ادامه برای بررسی کارایی روش پیشنهادی برای طرح اختلاط سه مطالعه عددی در نظر گرفته شده است.

۳-۱. نمونه اول

در نمونه اول فرض می‌شود که مقدار اسلامپ برابر ۱۵ میلی‌متر، مدول نرمی ماسه برابر با ۲/۸، مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۲۶ مگاپاسکال، وزن مخصوص ظاهری شن خشک میله خورده برابر با ۳۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سنگدانه مورد استفاده باریت با چگالی ۴/۳، سیمان تپ یک با چگالی ۳/۱۵ و چگالی ریزدانه ۲/۶۴ است. مقدار بیشینه خمیر بتن ۵۵٪ و کمینه مقدار خمیر بتن برابر با ۲۵٪ در نظر گرفته شده است. ضرایب هزینه در تابع هدف به صورت ۱۰ تومان به ازای هر یک کیلوگرم آب، ۹۰ تومان به ازای هر کیلوگرم سیمان، ۱۱۰ تومان به ازای هر کیلوگرم سنگدانه باریت و ۱۶ تومان به ازای هر کیلوگرم ماسه است. وزن مخصوص سنگدانه باریت، ماسه، سیمان و آب به ترتیب برابر با ۳۰۰۰،

جدول ۱- مقادیر طرح اختلاط، مقاومت فشاری آزمایشگاهی، توری و خطای رابطه برازش داده شده

Design number	Coarse aggregate weight (kg)	Fine aggregate weight (kg)	Water weight (kg)	Cement weight (kg)	Aggregate density	Experimental strength (Mpa)	Theoretical strength (Mpa)	Error of the relation
1	1412	941	214	610	4.3	42.5	41.81	1.6
2	1514	1010	214	475.5	4.3	35.4	35.72	-0.91
3	1579	1052	214	389	4.3	26.5	26.53	-0.13
4	1490	993	214	610	4.6	41.4	42.72	-3.2
5	1597	1065	214	475.5	4.6	36.25	35.37	2.42
6	1668	1112	214	389	4.6	26.5	26.17	1.23
7	1702	1135	214	610	5.1	45.4	44.6	1.75
8	1825	1217	214	475	5.1	35.5	35.89	-1.11
9	1907	1271	214	389	5.1	28.3	28.42	-0.43

Table 1. The values of the mix components, the theoretical and experimental compressive strength, and error of the relation

مشاهده می‌شود روند بهینه‌سازی باعث شده که کاهش هزینه‌ای برابر با ۳۳۰۰۰ تومان (۱۴ درصد) در طرح اختلاط با مقاومت یکسان نسبت به روش کلاسیک داشته باشد. شکل (۲) تاریخچه همگرایی طرح اختلاط بهینه است که نشان‌دهنده تاثیر آگوریتم بکار رفته در روند بهینه‌سازی است.

جدول ۳. نتایج نهایی طرح اختلاط برای مقاومت ۳۵ مگاپاسکال

Conventional value	Optimal value	Parameter
35	35	strength (Mpa)
229632	194148	cost (toman)
4.3	4.6	density
475.5	300	cement (kg)
214	150.4	Water (kg)
1010	1154	Fine aggregate (kg)
1514	1338	coarse aggregate (kg)

Table 3. Final results of mix design for strength of 35 Mpa

شکل ۲. تاریخچه همگرایی هزینه برای مقاومت ۳۵ مگاپاسکال

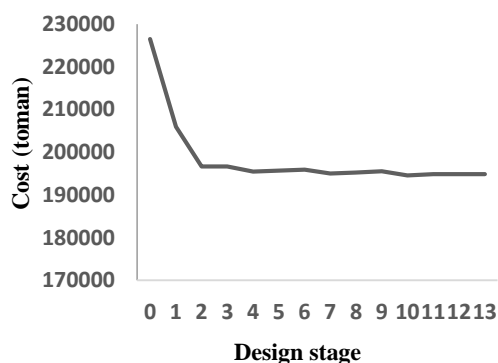


Fig. 2. Iteration history of cost for strength of 35 Mpa

۳-۳. نمونه سوم

در نمونه سوم به بهینه‌سازی بتن با مقاومت ۴۵ مگاپاسکال پرداخته می‌شود، که نتایج مطابق با جدول شماره (۴) است که مشاهده می‌شود روند بهینه‌سازی هزینه طرح اختلاط را به میزان ۲۴۰۰۰ تومان (۱۰ درصد) نسبت به روش مرسوم کاهش داده است. بنابراین با روش پیشنهادی تحقیق می‌توان هزینه ساخت بتن

پس از محاسبه طرح بهینه، مقادیر متغیرها به شرح زیر در جدول شماره (۲) خلاصه شده و با مقادیر متناظر در طرح اختلاط به روش کلاسیک نیز مقایسه شده است. مشاهده می‌شود روند بهینه‌سازی باعث شده که در طرح اختلاط با مقاومت یکسان به میزان ۳۸۰۰۰ تومان هزینه طرح بهینه نسبت به روش کلاسیک کاهش یابد. بنابراین با روش پیشنهادی تحقیق می‌توان هزینه ساخت بتن سنگین را کاهش داد. شکل (۱) تاریخچه همگرایی طرح اختلاط بهینه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود طرح بهینه تنها پس از ده چرخه طراحی حاصل شده است که نشان‌دهنده موثر بودن آگوریتم پیشنهادی است.

جدول ۲- نتایج نهایی طرح اختلاط برای مقاومت ۲۶ مگاپاسکال

Conventional value	Optimal value	Parameter
26	26	strength (Mpa)
227672	189760	cost (toman)
4.3	4.6	density
389	300	cement (kg)
214	150	water (kg)
1052	1100	Fine aggregate (kg)
1579	1306	coarse aggregate (kg)

Table 2. Final results of mix design for strength of 26 Mpa

شکل ۱. تاریخچه همگرایی هزینه برای مقاومت ۲۶ مگاپاسکال

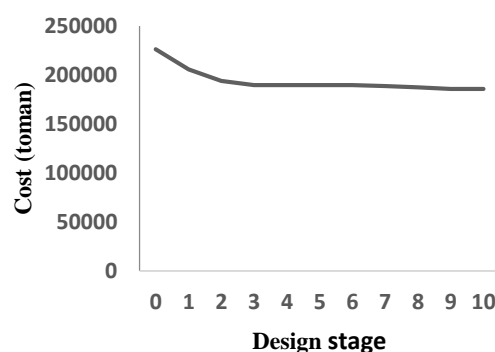


Fig. 1. Iteration history of cost for strength of 26 Mpa

۳-۲. نمونه دوم

در نمونه دوم از مقاومت ۳۵ مگاپاسکال برای بدست آوردن طرح بهینه استفاده می‌شود، که نتایج مطابق با جدول شماره (۳) است.

با کاهش سنگ‌دانه، سیمان و آب و در طرف مقابل با افزایش ریزدانه به طور همزمان، تابع هدف را کمینه کرده و قیود مورد نظر از قبیل نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری، کمینه وزن مخصوص و غیره را نیز تامین می‌کند.

همان‌گونه که ملاحظه کردید مقدار چگالی درشت‌دانه در طرح‌های بهینه افزایش پیدا کرده و بدین معنا است که اگر در طرح اختلاط از درشت‌دانه‌های سنگین با عیار بالاتر و چگالی بیشتر استفاده شود، محدودیت‌های مربوط به مدل بهینه سازی در هزینه کمتری تامین می‌شود.

با توجه به مطالعات موردی که مربوط به طرح اختلاط با مقاومت‌های مختلف است، مشاهده می‌شود که در صورت افزایش مقاومت فشاری مورد انتظار برای طرح اختلاط، مقادیر سیمان، سنگدانه و ریزدانه افزایش پیدا کرده و مقدار آب تقریباً ثابت است، این موضوع نشان می‌دهد با کاهش مقدار نسبت آب به سیمان مقاومت نمونه بتن افزایش پیدا می‌کند.

برای رسیدن به مقاومت فشاری مورد انتظار بالاتر، مقدار ریزدانه نرخ افزایش بالاتری نسبت به نرخ افزایش مقدار سیمان و درشت‌دانه دارد. که دلیل این امر بالا بودن هزینه واحد سیمان و درشت‌دانه معدنی با چگالی زیاد نسبت به ریزدانه در تابع هدف است.

تعداد کم چرخه‌های طراحی در نمونه‌های عددی مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی دارای سرعت و نرخ همگرایی مطلوبی در رسیدن به جواب بهینه طرح اختلاط است.

شکل ۴. مقایسه هزینه مربوط به طرح اختلاط با مقاومت‌های مختلف

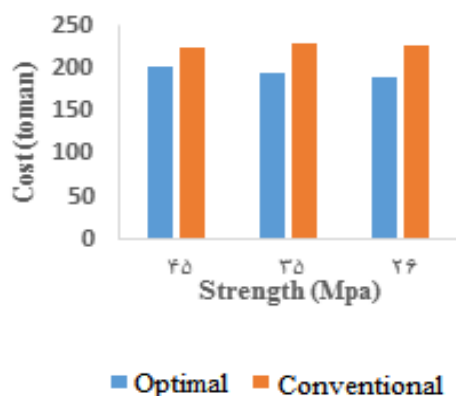


Fig 4. Comparison of the cost of mixing designs with different strengths

سنگین را کاهش داد. شکل (۳) نشان‌دهنده تاریخچه همگرایی الگوریتم پیشنهادی در روند بهینه سازی است. همانطور که ملاحظه می‌شود طرح بهینه تنها پس از ۹ چرخه طراحی حاصل شده است.

جدول ۴. نتایج نهایی طرح اختلاط برای مقاومت ۴۵ مگاپاسکال

Conventional value	Optimal value	Parameter
45	45	strength (Mpa)
224160	203200	cost (toman)
4.3	4.6	density
610	319	cement (kg)
214	150	water (kg)
941	1400	Fine aggregate (kg)
1412	1369	coarse aggregate (kg)

Table 4. Final results of mix design for strength of 45 Mpa

شکل ۳. تاریخچه همگرایی هزینه برای مقاومت ۴۵ مگاپاسکال

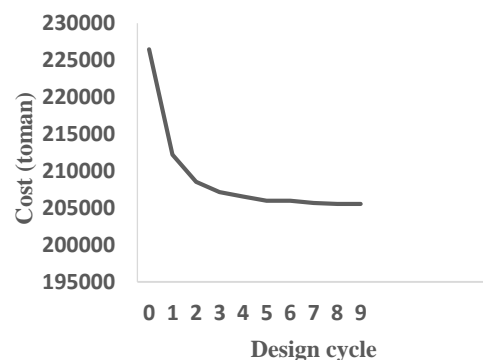


Fig 3. Iteration history of cost for strength of 45 Mpa

۴. تحلیل نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که برای بهینه کردن طرح اختلاط بتن سنگین مقدار سیمان، سنگ‌دانه و آب کاهش و مقدار ریزدانه افزایش داشته است که دلیل این امر به ضرایب هزینه در تابع هدف مربوط می‌شود، بطوریکه ضریب هزینه مربوط به سنگ‌دانه و سیمان زیاد بوده و مقدار ضریب هزینه ریزدانه نسبت به سنگ‌دانه و سیمان کمتر است. بدین ترتیب الگوریتم بهینه‌سازی

- [3] Standard, B., 2006. Concrete—Complementary British Standard to BS EN 206-1-Part 1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier.
- [4] ACI Standard 211.1, 1996, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, Part I,
- [5] Lagergren, E.S., Snyder, K.A. and Simon, M.J., 1997. Concrete Mixture Optimization Using Statistical Mixture Design Methods.
- [6] Xi, Y., Pui-shum, B.S. and Xie, Z., 2001. *Development of optimal concrete mix designs for bridge decks* (No. CDOT-DTD-R-2001-11.), Colorado Department of Transportation, Research Branch..
- [7] Ramazanianpour A & Hasankhani A. 2003, Optimal mixing plan for roller concrete. *The 6th annual international conference of civil engineering*, Isfahan University of Technology. (In Persian)
- [8] Bahrvarian. M. Zarei . M, 2004 , Optimization of polymer concrete. *Iranian Concrete Association Quarterly*. 20-27-31. (In Persian)
- [9] Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu, A. and Ozbebek, H., 2009. Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. *Construction and building materials*, 23(2), pp.694-702.
- [10] Habibi. A. safari .H , mohamadi ,W. 2011, Concrete mixing design using optimization principles and based on laboratory results, . *Concrete Research Magazine*, 4th year. (In Persian)
- [11] Esmaelnia. M. Faridi M. Faridi M, 2012.M, Optimization of mixing design of self-compacting concrete using Taguchi method., *The first national conference on civil engineering materials and structures*, kerman. (In Persian)
- [12] Ganjavian, A. Javaherzadeh , S. 2015, Optimization of self-compacting concrete mixing with intelligent algorithms. *Second National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development of Iran*., Tehran. Center for sustainable development solutions. (In Persian)
- [13] Eskandari. H, Pakzad. A. Taibinia. M. 2013, Optimization of self-compacting concrete mixing modeling ., *Concrete research* 2,6 25-38. (In Persian)
- [14] Arora, J . Abolbashari , M. 1999, Introduction to Optimum Design. First & Second Edition
- [15] National Concrete Mix Design Guide 2013., *Building Research Center*. (In Persian)
- [16] Abdolmaleki . B. Armaghani; A., Moradi . M. 2015. Investigation of the effect of different aggregates on the mechanical properties of heavy concrete. *Second National Earthquake Conference*. Qazvin . (In Persian)

در شکل (۴) کاهش مقدار هزینه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی در طرح اختلاط‌های مختلف با مقاومت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هزینه طرح اختلاط با روش بهینه در همه مقاومت‌های مورد انتظار، کمتر از هزینه طرح اختلاط مربوطه با روش کلاسیک است.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، یک روش جدید بر اساس اصول بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی درجه دوم برای طرح اختلاط بتن سنگین توسعه یافت. به این منظور، ابتدا طرح اختلاط بتن سنگین به عنوان یک مساله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شد، و رابطه مقاومت فشاری بتن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر اساس متغیرهای طراحی ارائه شد. با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای برنامه ریزی درجه دوم، طرح اختلاط بتن سنگین با هدف کمینه کردن هزینه مربوط به اجزای اصلی آن انجام و نشان داده شد که هزینه طرح اختلاط به دست آمده از روش پیشنهادی در مقایسه با هزینه حاصل از روش طرح اختلاط مرسوم، کمتر بوده و روش پیشنهادی دارای نرخ همگرایی مطلوبی برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه است. با بررسی نمونه‌های عددی نشان داده شد که در صورت کاهش مقادیر درشت‌دانه، سیمان، آب و افزایش مقدار ریزدانه هزینه طرح اختلاط کاهش پیدا می‌کند.

References

۶. مراجع

- [1] Onwuka, D.O., Okere, C.E. and Onwuka, S.U., 2013. Prediction of Concrete Mix Cost Using Modified Regression Theory. *Nigerian Journal of Technology*, 32(2), pp.211-216.
- [2] ACI Committee 304, 1996“*Heavyweight concrete, Measuring, Mixing, transporting, and, Placing* Detroit, American Concrete Institute, (ACI 304.3R- 96)”,

Optimization of heavy concrete mix design based on experimental results

A.R. Habibi^{1*}, Y. Rahmani², S. Saeidpour³

- 1- Associate Professor , Faculty of engineering, Shahed University
- 2- M.Sc. of structural Engineering , Faculty of engineering, University of Kurdistan
- 3- M.Sc. of structural Engineering , Faculty of engineering, University of Kurdistan

* ar.habibi@shahed.ac.ir

Abstract

The procedures for measuring, mixing, transporting, and placing heavyweight concrete are similar to those used in conventional concrete construction; however, special expertise and thorough planning are necessary for the successful completion of this type of concrete. The use of heavyweight concrete in construction is a specialized field. Heavyweight concrete is used in counterweights of bascule and lift bridges, but it is generally used in radiation shielding structures to absorb gamma rays and differs from normal weight concrete by having a higher density and special compositions to improve its attenuation properties. When heavyweight shielding concrete is used to attenuate neutrons, sufficient material of light atomic weight, which produces hydrogen, should be included in the concrete mixture. Some aggregates are used because of their ability to retain water of crystallization at elevated temperatures, which ensures a source of hydrogen not necessarily available in heavyweight aggregate.

Cements would be suitable for conventional concrete and produce the required physical properties, are suitable for use in heavyweight concrete. Low-alkali cement should be used when alkali-reactive constituents are present in the aggregates and a moderate or low-heat cement should be used for massive members. To avoid high and rapid heat of hydration and resultant cracking, it is advisable not to use Type III cement or accelerators unless the concrete temperature is controlled by specially designed refrigeration systems. Thorough examination and evaluation of heavyweight aggregate sources are necessary to obtain material suitable for the type of shielding required. These sources are limited, and a material survey should be conducted to determine availability, chemical and physical qualities. The supplier's sources should be inspected to evaluate rock composition, abrasion resistance, and density since these properties may vary from one location to another within a deposit. The purchaser must realize that mineral ores are not as uniform as normal weight concrete aggregates and make appropriate allowances. Limited resources and increasing use of concrete, particularly in the industrial production cause that the heavy concrete be useful. In order to optimize production of heavy concrete, the most basic parameters that must be changed is the mix design. Optimization of the concrete mixture design is a process of search for a mixture for which the sum of the costs of the ingredients is lowest, yet satisfying the required performance of concrete, such as workability strength and durability. For this purpose, heavy concrete mix design optimization model is firstly defined and then optimal mix design will be achieved, by using an optimization algorithm. The experimental data were utilized to carry out analysis of variance. To develop a polynomial regression model for compressive strength, five design factors (cement, coarse aggregate, fine aggregate, water and density) were considered in this study. The numerical results shows that the amounts of coarse aggregate and cement are simultaneously reduced and amount of the fine aggregate is increased in the optimum mix design. Considering mass production concrete in nuclear power plants, this optimal mix design methods and reduce the cost of concrete can greatly reduce the cost of construction.

Keyword: mix design, heavy concrete, optimization