

تحقیقات بتن  
سال ششم، شماره دوم  
بهار و تابستان ۹۲  
ص ۱۱۴-۱۰۵  
تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۰  
تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۱۰

## توسعه یک روش جدید برای طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی

علیرضا حبیبی\*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

مبین شهریاری

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کردستان

### چکیده

در این مقاله، یک روش طرح اختلاط بهینه برای بتن غلتکی ارائه و نشان داده می‌شود که هزینه ساخت بتن غلتکی طراحی شده براساس آئین‌نامه بتن آمریکا ACI207 را می‌توان کاهش داد به گونه‌ای که همان مقاومت مشخصه طرح اختلاط عادی آئین‌نامه را تأمین کند. به‌عنوان یک نمونه عملی، طرح اختلاط بهینه یک نمونه بتن غلتکی با مقاومت مشخصه ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع که مقاومتی در حدود مقاومت داده‌های آزمایشگاهی موجود دارد، با روش جدید انجام می‌شود. نتایج با روش کلاسیک طرح اختلاط بتن غلتکی مقایسه و بهبود نتایج در روش بهینه‌سازی نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، بتن غلتکی، طرح اختلاط.

---

\* نویسنده مسؤل: ar.habibi@uok.ac.ir

## ۱- مقدمه

رمضانیاپور و حسن خانی در سال ۲۰۰۳ نسبت بهینه اجزای تشکیل دهنده در طرح اختلاط بتن غلتکی را تعیین نمودند [۳]. آن‌ها نخست به بررسی تأثیر مصالح تشکیل دهنده بتن غلتکی بر روی خواص مقاومتی آن پرداختند و سپس شرایط سنگدانه در تعیین نسبت‌های بهینه جهت دستیابی به مقاومت حداکثر را بررسی نمودند. بهرویان و زارعی در سال ۲۰۰۴ بهینه‌سازی بتن‌های پلیمری را انجام دادند [۴]. آن‌ها در این تحقیق از یکی از روش‌های بهینه‌سازی بتن پلیمری که در انستیتوی ملی استاندارد و تکنولوژی ایالات متحده آمده است، استفاده نمودند. در تحقیق آن‌ها، دانسیته، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه بر روی دو نوع بتن پلیمری اپوکسی و بتن‌های پلیمری پلی‌استری انجام شد. مستوفی‌نژاد و رئیسی در سال ۲۰۰۵ به بررسی اثر پودر سنگ و بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از منحنی‌های هم‌پاسخ<sup>۱</sup> پرداختند [۵]. آن‌ها در مطالعه خود، مقاومت ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین نقش پودر سنگ آهک و میکروسیلیس را بر مقاومت فشاری بررسی کردند. به در سال ۲۰۰۷ با استفاده از شبکه‌های عصبی و تکنیک‌های بهینه‌سازی، یک روش تحلیلی برای بهینه‌کردن نسبت‌های اختلاط بتن مرکب با کمترین هزینه و تأمین عملکردهای مورد نیاز شامل مقاومت فشاری و اسلامپ ارائه نمود. او قیده‌های مقاومت فشاری و اسلامپ را براساس شبکه‌های عصبی مدل نموده و پس از فرموله کردن مسأله به صورت استاندارد، آن را با روش برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ژنتیک حل کرد. در این تحقیق، یک مجموعه بهینه از نسبت‌های اختلاط با یک محدوده کاربردی برای اسلامپ ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر و مقاومت فشاری ۲۵ تا ۵۵ مگاپاسکال به دست آمد [۶]. ازبای و همکارانش در سال ۲۰۰۸، تحقیقاتی را روی نسبت‌های اختلاط بتن خودمتراکم با مقاومت بالا<sup>۲</sup> انجام دادند [۷]. آن‌ها در این تحقیق از یک روش تجربی برای طراحی بهینه استفاده کردند و در یک رتبه‌بندی، میزان و اثر هر یک از نسبت‌ها را بر روی بتن‌های خود متراکم با مقاومت بالا در

ساخت سدها با شیوه بتن غلتکی فناوری نسبتاً جدیدی می‌باشد که در طول دهه اخیر پیشرفت زیادی کرده است و از کشورهای توسعه یافته به کشورهای در حال توسعه انتقال یافته است. از مزایای این شیوه می‌توان به اقتصادی بودن و سرعت بالای اجرا اشاره کرد. طرح اختلاط برای بتن غلتکی که شامل اجزاء اصلی متعدد می‌باشد، اغلب به روش پرخمیر و با در نظر گرفتن حدود روانی انجام می‌شود. در روش کلاسیک تعیین طرح مخلوط، معمولاً با داشتن مقاومت طراحی با استفاده از نموداری مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، می‌توان نسبت‌های حجمی پوزولان به سیمان و نسبت‌های حجمی آب به مواد سیمانی را به یکدیگر مربوط کرد و سپس با انجام فرضیاتی مقدار هر یک از اجزا را در واحد حجم بتن به دست آورد. رسیدن به بهترین نتیجه، در مورد یک عملیات، در حالی که محدودیت‌های مشخصی برآورده شده باشند، بهینه‌سازی نامیده می‌شود. در مقایسه با فرآیند طراحی کلاسیک، فرآیند بهینه‌سازی بسیار منظم‌تر است و از اطلاعات موجود برای اصلاح طراحی استفاده می‌کند. با این وجود، فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند به مقدار قابل توجهی از تجربه و قوه ابتکار طراح بهره‌مند شود. با وجود سابقه زیاد طراحی بهین در مورد سازه‌ها، قدمت بهینه‌سازی در مورد طرح اختلاط بتن زیاد دور نیست. اولین کار جدی در این زمینه توسط ماریسا و همکارانش در سال ۱۹۹۷ انجام شد [۱]. این محققان 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 چندجمله‌ای‌های شرف درجه ۲ استفاده کردند [۱]. ژی و همکارانش در سال ۲۰۰۱ چهار آزمایش مختلف به منظور توصیف خواص مکانیکی و دوام بتن انجام دادند. آزمایش‌های انجام شده توسط آن‌ها شامل آزمایش مقاومت مشخصه، مقاومت در برابر ترک، نفوذپذیری کلرید در زمان‌های مشخص بر روی همه نمونه‌ها و آزمایش انقباض بتن بر روی برخی نمونه‌ها بود. در این تحقیق، با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، گزارشی در ارتباط با توسعه طرح اختلاط بهینه بتن برای عرشه‌های پل منتشر گردید [۲].

<sup>۱</sup> Response Surface Methodology (RSM)

<sup>۲</sup> High Performance Self Compacting Concrete

گام ۱- انتخاب نسبت‌های حجمی پوزولان به سیمان P/C و آب به مواد سیمانی W/(C+P) به کمک شکل ۱ با انتخاب مقاومت طرح.

گام ۲- تعیین حداقل خمیر مواد سیمانی مورد نیاز با بهینه کردن دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت. در صورت عدم دستیابی به دانه‌بندی بهینه می‌توان درصد حجم خمیر بدون هوا به ملات بدون هوا را بین ۰/۳۸ و ۰/۵ در نظر گرفت.

گام ۳- تعیین حجم سنگدانه درشت ( $V_{ca}$ ) با روش آزمون جهت رسیدن به زمان وی‌بی اصلاح شده مورد نظر یا انتخاب مقدار مناسب از جدول ۱.

گام ۴- در نظر گرفتن مقدار هوای داخل بتن بین ۱ تا ۲ درصد حجم کل بتن.

گام ۵- محاسبه حجم ملات بدون هوا در متر مکعب.

گام ۶- محاسبه حجم خمیر بدون هوا ( $V_p$ ) با استفاده از حجم انتخاب شده در گام ۱.

گام ۷- تعیین حجم سنگدانه‌های ریز.

گام ۸- تعیین حجم آب.

گام ۹- تعیین حجم سیمان.

گام ۱۰- تعیین حجم پوزولان.

گام ۱۱- محاسبه جرم مصالح با ضرب نمودن حجم آن‌ها در جرم حجمی هر یک از آن‌ها.

### ۳- مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط

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. با این تعریف، یک مسئله بهینه‌سازی را در حالت استاندارد می‌توان مطابق روابط زیر فرموله نمود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{Subject to } g_i(x) \leq 0 \quad i=1, \dots, m \\ & \text{Subject to } h_i(x) = 0 \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

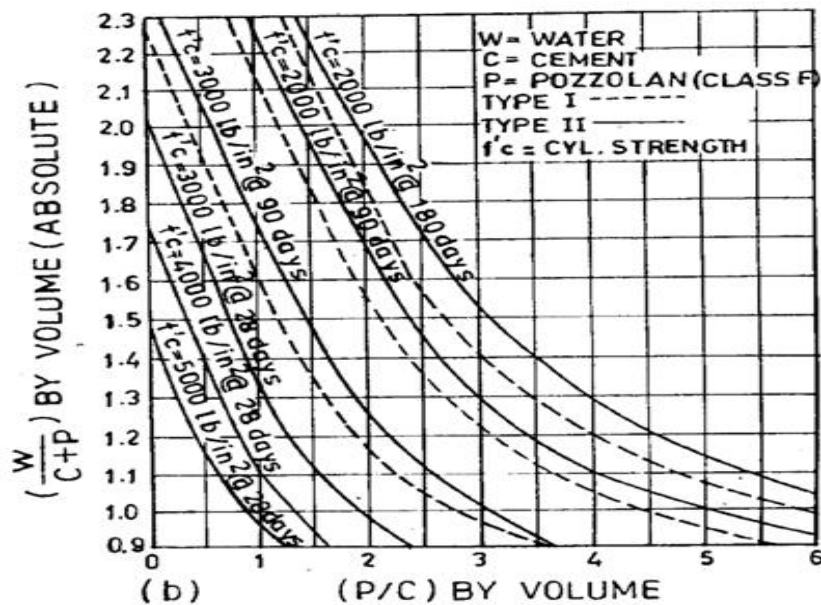
که در آن،  $x$  بردار متغیرهای طراحی،  $f$  تابع هدف و  $m$  و  $n$  به ترتیب تعداد قیود طراحی نامساوی و مساوی می‌باشد. در ادامه‌ی این بخش، اجزای مختلف مدل بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن غلتکی تشریح می‌گردد.

حالت‌های تازه و سخت شده نشان دادند [۷]. مورلی و کندسمی در سال ۲۰۰۹ طرح اختلاط بهینه بتن‌های خودتراکم با مقاومت بالا را با استفاده از روش منحنی‌های هم‌پاسخ، مورد مطالعه قرار دادند [۸]. آن‌ها در این تحقیق برنامه‌ای تجربی برای بهینه‌سازی چهار جزء اصلی بتن حاوی خاکستر بادی ارائه نمودند که شش معیار اصلی را مد نظر قرار می‌داد. مدل ارائه شده در تحقیق آن‌ها علاوه بر تعیین نسبت‌های اجزای اصلی، درصد بهینه مصرف هر یک از مواد مضاف را برای دستیابی به مقاومت مشخصه ارائه می‌کرد. حبیبی و یوسفی در سال ۱۳۸۸ یک روش طرح اختلاط بهینه براساس برنامه‌ریزی خطی برای بتن با مقاومت معمولی را توسعه دادند [۹]. آن‌ها نشان دادند که می‌توان هزینه ساخت بتن را به گونه‌ای کاهش داد که همان مقاومت مشخصه طرح اختلاط عادی آیین‌نامه را تأمین نماید. 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 [۱۰]. به این منظور در مدل بهینه‌سازی، محدودیت مقاومت فشاری بتن به‌عنوان یک قید اصلی، براساس نتایج آزمایشگاهی فرمول‌بندی شد. در این تحقیق نشان داده شد که روش به کار رفته، ضمن ارضای نمودن محدودیت مقاومت و سایر محدودیت‌های طرح، قابلیت کاهش هزینه ساخت بتن را به طور مؤثری دارد.

هدف از تحقیق حاضر بهینه کردن طرح اختلاط بتن غلتکی با استفاده از اصول علم بهینه‌سازی می‌باشد. به این منظور ابتدا یک مدل بهینه‌سازی برای طرح اختلاط بتن غلتکی توسعه داده می‌شود که در آن تابع هدف، هزینه ساخت یک مترمکعب بتن و قیود طراحی شامل کنترل مقاومت طرح و سایر محدودیت‌های جانبی براساس آیین‌نامه می‌باشد. سپس یک روش مؤثر برای حل مسئله طرح اختلاط ارائه می‌گردد. جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، طرح اختلاط بهینه برای یک نمونه کاربردی انجام شده و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از روش مرسوم مقایسه می‌شود.

### ۲- روش مرسوم طرح اختلاط

مراحل طرح اختلاط بتن غلتکی براساس روش کلاسیک که روش پرخمیر نامیده می‌شود، معمولاً شامل مراحل زیر می‌باشد:



شکل ۱- تغییرات نسبت حجمی پوزولان به سیمان در مقابل نسبت حجمی آب به مواد سیمانی مطابق ACI 207.5R [۱۱]

جدول ۱- حجم سنگ دانه درشت توصیه شده براساس ACI 207.5R [۱۱]

اندازه حداکثر سنگدانه‌ها	۹/۵mm	۱۹mm	۳۸mm	۷۶mm	۱۱۴mm	۱۵۲mm
حجم مطلق درشت دانه (درصد)	۴۲-۴۸	۴۶-۵۲	۵۲-۵۶	۵۷-۶۱	۶۱-۶۳	۶۳-۶۴

### ۳-۱- متغیرهای طراحی

به پارامترهایی که برای تشریح طراحی یک سیستم انتخاب می‌شوند، متغیرهای طراحی می‌گویند. اولین قدم مهم در رابطه‌سازی مطلوب یک مسئله بهینه‌سازی، مشخص کردن متغیرهای طراحی است. اگر متغیرهای مناسب انتخاب نشوند، رابطه‌سازی 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 غلتکی، تعیین مقادیر آب، سیمان، پوزولان، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه برای تأمین خصوصیات مکانیکی بتن مورد نظر است، در تحقیق حاضر، مقادیر جرم سیمان  $X_1$ ، جرم آب  $X_2$ ، جرم پوزولان  $X_3$ ، جرم سنگدانه ریز  $X_4$  و جرم سنگدانه درشت  $X_5$  به‌عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند.

طرح‌های مختلف را با هم مقایسه کنیم. معیار باید یک تابع اسکالر باشد که مقدار عددی آن را بتوان با مشخص کردن متغیرهای طراحی به‌دست آورد، یعنی باید تابعی از متغیرهای طراحی باشد. توابع هدف متفاوتی با توجه به کاربرد و استفاده‌ای که از سازه بتنی، مورد نظر است، می‌توانند مطرح باشند. در این تحقیق، هزینه ساخت یک متر مکعب بتن غلتکی به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$f = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 \quad (2)$$

که در این رابطه،  $c_1$ ، قیمت یک کیلوگرم سیمان مصرفی برابر ۱۱۰ تومان،  $c_2$ ، قیمت یک کیلوگرم آب مصرفی برابر یک تومان،  $c_3$ ، قیمت یک کیلوگرم پوزولان برابر ۵۵ تومان و  $c_4$  قیمت یک کیلوگرم ماسه برابر ۲/۴ تومان و  $c_5$  قیمت یک کیلوگرم شن برابر ۲/۲ تومان فرض می‌شوند. هرچند با توجه به شرایط روز می‌توان مقادیر آن‌ها را اصلاح نمود. لازم به ذکر است که  $c_5$ ها براساس قیمت روز و شرایط اقتصادی برآورد

### ۳-۲- تابع هدف

برای یک سیستم، طرح‌های بسیاری قابل قبول هستند که بعضی از آن‌ها از بقیه بهترند. برای چنین ادعایی باید معیاری داشت تا

در روند تهیه طرح اختلاط بتن غلتکی معمولاً درصد هوا بین ۱ تا ۲ درصد حجم بتن انتخاب شده و نسبت‌های اختلاط برای یک متر مکعب بتن تعیین می‌گردند. به این دلیل، قید دوم و سوم مبنی بر همین واقعیت برای کنترل درصد حجم هوای موجود در بتن تعریف می‌شوند:

$$g_2 = \left( \frac{x_1}{3.15} + x_2 + \frac{x_3}{2.3} + \frac{x_4}{2.69} + \frac{x_5}{2.73} \right) \times \left( \frac{1}{1000} \right) - 0.99 \quad (5)$$

$$g_3 = 0.98 - \left( \frac{x_1}{3.15} + x_2 + \frac{x_3}{2.3} + \frac{x_4}{2.69} + \frac{x_5}{2.73} \right) \times \left( \frac{1}{1000} \right) \quad (6)$$

جدول ۱ همواره به‌عنوان یک راهنمای تعیین درصد حجم درشت‌دانه مورد استفاده طراحان بتن غلتکی می‌باشد و در تحقیق حاضر نیز حدود معرفی شده در این جدول به‌عنوان یک رکن اساسی از کار بهینه‌سازی در قالب قیدهای نامساوی چهارم و پنجم بیان شده است. این قیود مطابق رابطه (۷)، فرموله شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\max} = 9.5 \Rightarrow \begin{cases} g_4 = \frac{x_5}{27.3} - 48 \\ g_5 = 42 - x_5 \end{cases} \\ d_{\max} = 19 \Rightarrow \begin{cases} g_4 = \frac{x_5}{27.3} - 52 \\ g_5 = 46 - \frac{x_5}{27.3} \end{cases} \\ d_{\max} = 38 \Rightarrow \begin{cases} g_4 = \frac{x_5}{27.3} - 56 \\ g_5 = 52 - \frac{x_5}{27.3} \end{cases} \\ d_{\max} = 76 \Rightarrow \begin{cases} g_4 = \frac{x_5}{27.3} - 61 \\ g_5 = 57 - \frac{x_5}{27.3} \end{cases} \\ d_{\max} = 114 \Rightarrow \begin{cases} g_4 = \frac{x_5}{27.3} - 63 \\ g_5 = 61 - \frac{x_5}{27.3} \end{cases} \\ d_{\max} = 152 \Rightarrow \begin{cases} g_4 = \frac{x_5}{27.3} - 64 \\ g_5 = 63 - \frac{x_5}{27.3} \end{cases} \end{array} \right. \quad (7)$$

می‌شوند و هر کدام بطور مستقیم تابع هدف (مقدار هزینه) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در شرایط اقتصادی مختلف طرح‌های بهینه مختلفی به دست می‌آیند.

### ۳-۳- قیود طراحی

به طور کلی تمامی محدودیت‌هایی که یک طرح را تحت تأثیر قرار می‌دهند، قیود طراحی نامیده می‌شوند. یک طرح هنگامی قابل قبول تلقی می‌شود که کلیه قیود طراحی برآورده شوند. در تحقیق حاضر، قیود طراحی در نظر گرفته شده شامل  $g_1$  محدودیت مربوط به مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن غلتکی،  $g_2$  و  $g_3$  محدودیت‌های مربوط به درصد هوای موجود در بتن،  $g_4$  و  $g_5$  محدودیت‌های مربوط به حدود درصد حجمی درشت‌دانه (شن) موجود در بتن،  $g_6$  مربوط به محدودیت جرمی پوزولان نسبت به سیمان،  $g_6$  محدودیت مربوط به عیار سیمان و  $g_7$  و  $g_8$  محدودیت جرم حجمی بتن غلتکی می‌باشند. شایان ذکر است که  $g_6$  بر مبنای تجربه و قضاوت مهندسی تعیین می‌شود. علاوه بر این قیود که به‌عنوان قیود نامساوی در نظر گرفته می‌شوند، محدودیت  $h_1$  نیز به‌عنوان یک قید مساوی در نظر گرفته می‌شود که مربوط به نمودار شکل ۱ می‌باشد و با یک چندجمله‌ای مناسب برازش شده است.

اعمال قید  $g_1$  تضمین می‌کند که طرح اختلاط به دست آمده در حالت بهینه دارای مقاومت لازم باشد. برای اعمال این قید، نیاز به ایجاد یک رابطه بین مقاومت مشخصه مورد نظر و متغیرهای طراحی می‌باشد. هر تابعی که بتواند محدودیت مقاومت را با دقت مطلوبی تخمین بزند می‌تواند به‌عنوان یک رابطه مناسب به کار رود. در بخش ۳-۳-۱ چگونگی به دست آوردن رابطه مناسب شرح داده می‌شود و یک رابطه خطی مطابق رابطه زیر ارائه می‌گردد:

$$f = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (3)$$

که بدین ترتیب پس از به دست آمدن ضرایب  $a_i$  قید اول به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$g_1 = 140 - (a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5) \quad (4)$$

از داده‌های آزمایشگاهی مطابق جدول ۲ که مقاومت نمونه‌های مربوط به آن‌ها در حدود مقاومت مورد نظر می‌باشد، استفاده شده است.

داده‌های جدول ۲ مربوط به شرکت استراتوس می‌باشد که در روند طراحی بتن سد چگین به‌دست آمده‌اند. در آزمایش‌های مربوطه از پوزولان ایلام استفاده شده است.

از برآزش داده‌های جدول شماره ۲ رابطه زیر برای مقاومت فشاری به‌دست می‌آید و به این ترتیب ضرایب  $a_i$  بکار رفته در بخش قبل محاسبه می‌شود.

$$f_c = 1.4539x_1 - 8.6147x_2 + 0.7810x_3 - 2.8472x_4 + 3.2103x_5 \quad (12)$$

#### ۴- الگوریتم طراحی بهینه

در این بخش، به حل مسأله بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن غلتکی که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته و فرموله گردید، 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 بهینه‌سازی مقید، هدف کلی، تبدیل مسأله به یک مسأله فرعی آسان‌تر می‌باشد که حل آن می‌تواند به‌عنوان اساس یک فرایند تکراری بکار رود. یک ویژگی انواع روش‌های قدیمی تبدیل مسأله مقید به یک مسأله نامقید پایه می‌باشد، که با استفاده از یک تابع جریمه در مورد قیدهای نزدیک مرز یا قیدهای نقض شده تعریف می‌شود. در این روش مسأله مقید با حل متوالی چندین مسأله نامقید، که در نهایت به مسأله مقید همگرا می‌شود، حل می‌گردد. چنین روش‌هایی امروزه نسبتاً نامؤثر در نظر گرفته می‌شوند و روش‌هایی که بر حل معادلات KT تاکید دارند، جایگزین آنها شده‌اند. معادلات KT اساس بسیاری از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی غیرخطی از جمله روش‌های شبه نیوتنی مقید را تشکیل می‌دهد. این روش‌ها با بکار بردن اطلاعات درجه دوم، همگرایی را تضمین می‌کنند و عمدتاً به روش‌های SQP موسومند. در تحقیق حاضر، این روش برای حل مسئله طراحی مورد نظر بکار گرفته شده است. در هر تکرار اصلی روش SQP، تقریبی از تابع لاگرانژ با استفاده از یک روش به‌روز آورنده شبه نیوتنی به‌دست می‌آید. سپس این

با توجه به اینکه اساسی‌ترین مزیت استفاده از بتن غلتکی در سازه‌های بزرگی مثل سد، جنبه اقتصادی آن می‌باشد، در این راستا حداکثر سیمان مصرفی در واحد حجم بتن به‌عنوان قید ششم بیان شده است. با توجه به اینکه جرم واحد حجم بتن تقریباً در حدود ۲۴۵۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم می‌باشد، این محدودیت نیز به منظور جلوگیری از خطای احتمالی در کار و به عبارتی به‌عنوان یک کنترل ضمنی اعمال گردیده و در قیدهای نامساوی هفتم و هشتم به آن پرداخته شده است:

$$(8) g_6 = x_1 - 150$$

$$(9) g_7 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 - 2500$$

$$(10) g_8 = 2450 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)$$

قید آخر که تنها قید مساوی در نظر گرفته شده می‌باشد، تأثیر نمودار شکل ۱ را در کار بهینه‌سازی اعمال می‌کند. البته در این تحقیق، با توجه به فرضیات صورت گرفته که متعاقباً به آن پرداخته شده است، تنها نمودار مربوط به مقاومت فشاری ۹۰ روزه معادل با ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در رابطه گنجانده شده است.

$$h_1 = -0.01035 \times \left\{ \left( \frac{3150}{2300} \right) \times \left( \frac{x_3}{x_4} \right) \right\}^3 + 0.1736 \times \left\{ \left( \frac{3150}{2300} \right) \times \left( \frac{x_3}{x_4} \right) \right\}^2 - 1.0370 \times \left\{ \left( \frac{3150}{2300} \right) \times \left( \frac{x_3}{x_4} \right) \right\} + 3.1350 - \left\{ \frac{x_2}{\frac{x_1}{3.15} + \frac{x_3}{2.3}} \right\} \quad (11)$$

#### ۳-۳-۱- رابطه بین مقاومت فشاری و متغیرهای طراحی

جهت برقراری رابطه بین مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن و متغیرهای طراحی طرح اختلاط بتن، نوعاً توابع چندجمله‌ای برای مدل کردن استفاده می‌شوند. البته با توجه به اینکه مقاومت هدف در روند طراحی، ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع فرض شده است. برای اینکه دقت رابطه به‌دست آمده قابل قبول باشد،

بهینه که در جدول ۳ نشان داده شده است، حاصل می‌شود. روند همگرایی تابع هدف در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی دارای نرخ همگرایی بالایی بوده و جهت طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی به طور مؤثری عمل نموده است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که هزینه ساخت یک متر مکعب بتن براساس طرح اختلاط بهینه، برابر  $۱۲۰۶۴/۳۳$  تومان می‌باشد. حال اگر با همین فرضیات صورت گرفته، طرح اختلاط بتن با روش مرسوم انجام شود، مطابق نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که هزینه ساخت واحد حجم بتن به  $۱۴۳۳۰/۳۷$  تومان افزایش می‌یابد.

تقریب برای تولید یک زیر مسأله QP که هدف از آن یافتن جهتی برای جستجوی خطی می‌باشد، به کار می‌رود. برای آشنایی کامل با این روش می‌توان به مرجع [۱۲] مراجعه نمود.

### ۵- مثال عددی

به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در یافتن طرح بهینه بتن غلتکی، یک مثال عددی در نظر گرفته می‌شود. در این مثال، بزرگترین اندازه سنگدانه ۷۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. چگالی پوزولان، ماسه، شن و سیمان نسبت به آب به ترتیب برابر  $۲/۳$ ،  $۲/۶۹$ ،  $۲/۷۳$ ، و  $۳/۱۵$  فرض شده است. مقاومت هدف طراحی ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. در این مثال مشاهده می‌شود که تنها پس از ۴ چرخه طراحی، طرح اختلاط

جدول ۲- داده‌های مربوط به شرکت استراتوس در جریان ساخت سد چگین

شماره نمونه	مقدار سیمان (کیلوگرم)	مقدار پوزولان (کیلوگرم)	مقدار ماسه (کیلوگرم)	مقدار شن (کیلوگرم)	مقدار آب مصرفی (کیلوگرم)	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	هزینه (تومان)
RCC-II-7	۱۰۰	۲۵	۹۸۸	۱۲۰۸	۱۲۶	۱۴۲	۱۷۵۲۹/۸
RCC-II-8	۸۷/۵	۳۷/۵	۹۸۷	۱۲۰۸	۱۲۶	۱۳۶	۱۶۸۳۹/۹
RCC-II-13	۱۰۵	۴۵	۹۷۶	۱۱۹۲	۱۲۶	۱۶۲	۱۹۱۱۵/۸
RCC-II-14	۹۰	۶۰	۹۷۵	۱۱۹۲	۱۲۶	۱۳۳	۱۸۲۸۸/۴
RCC-II-19	۱۰۵	۷۰	۹۶۴	۱۱۷۸	۱۲۶	۱۴۶	۲۰۴۳۱/۲

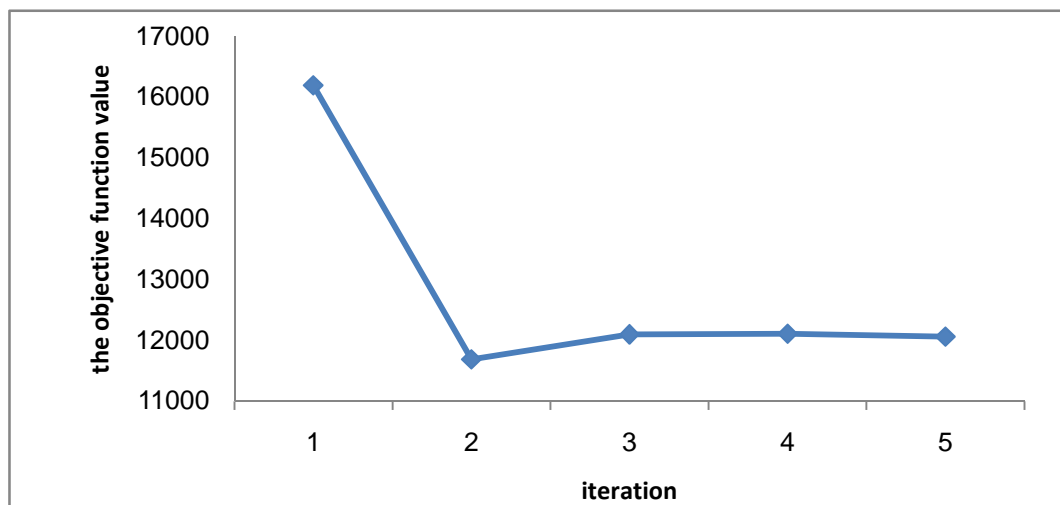
### ۶- نتیجه گیری

بهینه‌سازی بر مبنای برنامه‌ریزی درجه دوم، طرح اختلاط بتن غلتکی با هدف حداقل کردن هزینه مربوط به اجزای اصلی آن انجام شد. 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 نمونه‌های استفاده شده دارای مقاومت هدف حدوداً یکسانی می‌باشد. شایان ذکر است که مطابقت پیش‌بینی طرح بهینه حاصل شده با واقعیت، نیاز به

در این مقاله، یک روش جدید براساس اصول بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی درجه دوم برای طرح اختلاط بتن غلتکی توسعه یافت. به این منظور، ابتدا طرح اختلاط بتن غلتکی، به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی فرموله شد.

به منظور بیان صریح قیود طراحی در مدل بهینه‌سازی، یک تکنیک ساده و مؤثر برای بیان رابطه‌ی مقاومت فشاری بتن با اجزاء طرح اختلاط ارائه گردید. با به کارگیری الگوریتم

مطالعات آزمایشگاهی دیگری دارد که می‌تواند در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۲- روند هم‌گرایی تابع هدف

جدول ۳- نتایج طراحی براساس روش ارائه شده

مقدار سیمان	مقدار آب	مقدار پوزولان	مقدار ماسه	مقدار شن	هزینه
۴۰/۶۱	۹۳/۵۱	۴۰/۶۱	۷۶۹/۱۵	۱۵۵۶/۱۰	۱۲۰۶۴/۳۳

جدول ۴- نتایج طراحی براساس روش مرسوم طرح اختلاط

مقدار سیمان	مقدار آب	مقدار پوزولان	مقدار ماسه	مقدار شن	هزینه
۶۶/۶۳	۱۰۳/۱۲	۳۲/۴۳	۶۲۹/۴۶	۱۶۳۸	۱۴۳۳۰/۳۷

## ۷-مراجع

- [1]. Simon M.J., Lagergren E.S., Snyder K.A., "Concrete Mixture Optimization using statistical mixture design methods", International Symposium on High performance concrete, proceeding of the PCI/FHWA, New Orleans, Louisiana, October, p.p. 230-244, 1997.
- [2]. Xi Y., Shing B., Xie Z., "Development of optimal concrete mix designs for bridge decks", The Colorado Department of Transportation, Report No.CDOT-DTD-R-2001-11.
- [۳]. رضایانپور ع.ا.، حسن خانی ع.، "طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.
- [۴]. بهروریان م.، زارعی م.، "بهینه‌سازی بتن پلیمری"، فصلنامه انجمن بتن ایران، ۲۰، ۲۷-۳۱، ۱۳۸۳.
- [۵]. مستوفی‌نژاد د.، رئیسی م.، "بررسی تأثیر پودرسنگ آهک بر مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس و بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از منحنی‌های هم‌پاسخ"، استقلال، ۲، ۱، ۴۰۱-۴۱۱.
- [6]. I-Cheng Y., "Computer-aided design for optimum concrete mixtures", Cement & Concrete Composites, v.29, pp.193-202, 2007.
- [7]. Ozbay E., Oztas A., Baykasoglu A., Ozbebek H., " Investigating mix proportions of high strength self-compacting concrete by using Taguchi method", Construction and Building Materials, v.23, pp. 694-702, 2009.
- [8]. Murali T.M., Kandasamy S., "Mix proportioning of high performance self-compacting concrete using response surface methodology", The Open Civil Engineering Journal, v.3, pp. 93-97, 2009.
- [۹]. حبیبی ع.ر.، یوسفی م.، "بهینه‌کردن اجزاء اصلی بتن با استفاده از اصول بهینه‌سازی"، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، ۱۳۸۸.



[۱۰] حبیبی ع.ر.، صفاری ه.، محمدی و.، "طرح اختلاط بتن با استفاده از اصول بهینه‌سازی و براساس نتایج آزمایشگاهی"، مجله تحقیقات بتن، سال چهارم، ۱۳۹۰.

[11]. American Concrete Institute, "Report on Roller-Compacted Mass Concrete", ACI 307.5R, 2011.

[۱۲]. آروراج س.، ابوالبشری م.ح.، مقدمه‌ای بر طراحی بهین، جلد اول و دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۷۸.

## Development of A New Method for Optimum Mix Design of Roller Compacted Concrete

A.R. Habibi\*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

M. Shahryari

M.Sc Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

( Received: 2014/1/1 - Accepted: 2015/3/3)

### Abstract

In this paper, an optimum mix design method is presented for Roller-Compacted Concrete (RCC). It is shown that the total cost of RCC designed according to ACI207 requirements can be decreased so that its strength is equal to the same strength resulting from traditional mix design. As a practical example, optimum mix design of a RCC sample with a cylinder strength of  $140 \text{ Kg/cm}^2$  that is approximately equal to the strength of experimental specimens is performed through the new method. The results are compared with those obtained from traditional mix design method and it is shown that the results are improved.

**Keywords:** Optimization, RCC, Mix Design.

---

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