

مدل سازی طرح اختلاط بهینه بتن خودتراکم

حمید اسکندری*

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

امیر پاکزاد

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، پردیس دانشگاه حکیم سبزواری

مرتضی طیبی نیا

عضو هیأت علمی گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

چکیده

بتن خودتراکم، به دلیل روانی بالا سبب افزایش سرعت و کیفیت بیشتر در اجرا گردیده که این امر باعث گسترش روز افزون آن در صنعت ساختمان شده است. روش های طراحی طرح اختلاط بهینه این نوع بتن می تواند با کاهش هزینه ها، موجب تمایل بیشتر کارفرمایان به استفاده از آن و صرفه جویی اقتصادی گردد.

در این تحقیق، ضمن تعریف خواص این نوع بتن و روش های بهینه سازی، با بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تولید و طرح اختلاط از قبیل سیمان، شن، ماسه، آب، فوق روان کننده و مواد پودری به تعیین متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت های مربوط و همچنین معرفی روش های رایج ریاضی طرح اختلاط و مقایسه آنها، پرداخته و طرح اختلاط بهینه برای بتن خودتراکم با مقاومت بالا ارائه شده است.

نتایج نشان می دهد که طراحی بهینه طرح اختلاط بتن خودتراکم با مقاومت بالا با توجه به تعداد اجزای تشکیل دهنده آن، وابستگی زیادی به انتخاب صحیح نوع تابع هدف و محدودیت های انتخاب شده و تناسب رابطه هر کدام از موارد با مقاومت فشاری بتن خودتراکم و همچنین پارامترهای زیادی از نسبت مواد تشکیل دهنده اجزاء آن مانند نسبت آب به سیمان، آب به مواد پودری، نسبت سنگدانه و دیگر نسبت های مؤثر دارد.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، بهینه سازی، سیمان، مقاومت فشاری.

* نویسنده مسئول: Hamidiisc@yahoo.com

۱- مقدمه

بادی (PFA)، پودر سرباره خرد شده (GGBS) یا پودر سنگ آهک (LSP) سیالیت بتن را افزایش می‌دهد، بدون آنکه هزینه زیادی داشته باشد، می‌توان کمینه کردن مقدار سیمان و فوق‌روان‌کننده را از راه‌های بهینه‌سازی اقتصادی دانست. افزودن PFA یا GGBS یا LSP نیاز به فوق‌روان‌کننده را کاهش می‌دهد [۹]. امکان جداشدگی، خصوصاً در حضور موانع با فواصل نزدیک وجود دارد، که با افزودنی‌های مذکور می‌توان آن را کنترل کرد [۱۱]. در طراحی سعی می‌گردد که هزینه تولید کاهش یابد [۱۲] و روش‌های متعددی مانند فاکتوریل [۱۳] رایانه‌ای [۱۴، ۱۵] و استفاده از نمونه‌های با نسبت‌های مختلف اجزا [۱۶] در مسائل طراحی بهینه طرح اختلاط مخلوط‌های با اجزای مختلف مورد توجه تحقیقات اخیر قرار گرفته است [۱۷] با توجه به قیمت و نحوه تولید سیمان که باعث تولید گازهای مضر برای محیط زیست می‌شود، تولید بتن با سیمان کمتر، هم هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و هم به حفظ محیط زیست کمک می‌کند [۱۸، ۱۹]. مفهوم بهینه‌سازی برای طراحی بتن به‌عنوان صرف‌گترین هزینه با ایجاد ویژگی‌های مناسب و موردنظر است [۲۰-۲۲]. روش‌های مختلفی در برای طراحی توابع چندپارامتری جهت طرح اختلاط بتن، مانند روش طراحی سیمپلکس [۲۳] تابع پخش خطی [۲۴] فاکتوریل [۶] دو مرحله‌ای [۲۵] روش تجربی [۳۸، ۳۶، ۲۶] روش عددی [۳۴] معرفی شده‌اند. همچنین کاربرد ماسه به جای کل یا بخشی از سنگدانه درشت [۲۷] روش اوکامورا برای تولید بتن خودتراکم با مقدار زیاد مواد پودری و یک نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۳ [۲۸] از روش‌های کاربردی پیشنهادی در این زمینه هستند. روش‌های پیش‌بینی مانند شبکه عصبی [۳۳]، روش تاگوچی به‌عنوان یک روش طرح اختلاط بهینه بتن براساس داده‌های آماری و براساس نسبت‌های جرمی و یا حجمی اجزا به کل بتن [۳۱-۲۹]، و بهینه‌سازی براساس تعیین حجم فضای خالی برای سازه‌های متفاوت ذرات سلیلیکا با روش طراحی Behnken Box [۳۲] به‌عنوان روش‌های آماری طراحی اختلاط بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطالعاتی در زمینه تأثیر فوق‌روان‌کننده و Fly Ash [۳۵] و همچنین دما بر خصوصیات بتن خودتراکم حاوی Fly Ash انجام شده است [۳۷]. با

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 [۱] که روش‌های مختلفی برای آن وجود داشته که با صرف هزینه، انرژی و زمان برای آن همراه است [۲]. مقاومت فشاری بتن خصوصیتی است که به وسیله آن می‌توان بسیاری از ویژگی‌های بتن را تعیین نموده و یا تخمین زد [۳] و در حین فرآیند هیدراتاسیون در بتن، به‌دست می‌آید [۴]. روانی بتن یک فاکتور مهم برای قابلیت مناسب اجراست، که پس از فراگیر شدن استفاده از آرماتور در بتن از اوایل قرن بیستم و لزوم استفاده از بتن با کارایی بالا، مدت‌ها با افزایش آب به سیمان تامین می‌شد، که در تحقیقات بعدی روشن شد، مقدار زیاد آب و همچنین سیمان، نتایج زیان‌آوری به دنبال دارد [۵]. جهت رفع این مسأله در دهه ۸۰ میلادی در ژاپن و با تحقیقاتی برای تولید بتن با کارایی بالا، بتن خودتراکم توسط اوکامورا معرفی شد و استفاده از آن در جهان به سرعت افزایش یافت و تحقیقات گسترده‌ای برای تکمیل شناسایی آن انجام شد. اوکامورا و اوچی در سال ۱۹۹۸ بتن خودتراکم را بتنی معرفی می‌کنند که می‌تواند در داخل قالب جریان یابد و در یک فرآیند طبیعی آن را پر و از میان میلگردها و دیگر موانع موجود عبور کند. جریان و تراکم تحت اثر وزن خود بتن می‌باشد. همچنین طبق تعریف (EFNARC) بتن خودتراکم، بتنی است که قابلیت روانی در اثر وزن خود را داشته باشد و قالب را حتی در صورت وجود آرماتور با تراکم بالا، پر کند، بدون آنکه نیازی به ویبره زدن باشد و ترکیب همگن خود را از دست بدهد [۶]. برخی مؤسسات تحقیقاتی در زمینه شناسایی مواد و سیستم‌های پیشرفته در بتن، تلاش و خصوصیات آن را منتشر کردند [۷]. در بتن خودتراکم، فوق‌روان‌کننده و مواد پودری برای به‌دست آوردن کارایی بالا و گرانروی مناسب و عدم جداشدگی مهم است و برخی راهکارها برای نسبت اختلاط بتن خودتراکم از قبیل کاهش نسبت سنگدانه به مواد سیمانی، افزایش مقدار خمیری سیمان با نسبت آب به سیمان مشخص، کنترل بزرگترین اندازه سنگدانه درشت و مقدار کلی آن، استفاده از مخلوط‌های با کارایی‌های مختلف بالا پیشنهاد شده است [۸]. در این میان با توجه به اینکه سیمان و فوق‌روان‌کننده (SP) باعث افزایش هزینه‌ها شده، ولی ترکیبات معدنی مانند پودر خاکستر

بررسی می شود. تمرکز اصلی بهینه سازی بر تصمیم گیری در مورد یک مسأله است. در بهینه سازی، روش های علمی بکار برده می شود که شامل فرآیند تعریف مسأله، فرموله کردن فرضیه، آزمون فرضیه و کسب نتایج است. مدل های موجود در این رشته، مدل های ریاضی هستند و ضمناً از رایانه نیز در آن بهره برداری بسیاری می شود.

روش های برنامه ریزی برای بهینه سازی به چند دسته تقسیم بندی می شوند که از آن جمله برنامه ریزی خطی که تابع هدف و محدودیت ها در آن تابعی خطی از متغیرهای تصمیم است و با روش های ترسیمی و سیمپلکس تحلیل می شود؛ برنامه ریزی غیرخطی (یک متغیره و چندمتغیره) که به دو نوع با محدودیت و بدون محدودیت دسته بندی می شود و تابع هدف و یا محدودیت های آن رابطه غیرخطی با متغیرهای تصمیم دارند و غالباً با روش های دیفرانسیل و یا عددی محاسبه می گردد؛ برنامه ریزی هندسی؛ برنامه ریزی توپولوژی، بهینه سازی شکل، دینامیکی، که هر کدام از این روش ها بسته به نوع کاربرد مسأله و مدل تابع هدف، می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۴۱-۴۰].

۳-۱- روش های مبتنی بر ریاضی و آمار

در این روش ها ابتدا یک مدل تابع ریاضی برای یکی از خصوصیات بتن مثل مقاومت فشاری و یا کارایی و ... انتخاب می شود. این تابع می تواند خطی یا غیرخطی باشد، سپس با توجه به روش های مختلف، چندین طرح اختلاط برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی محاسبه می گردد. تعداد این نمونه ها بستگی به نوع تابع انتخاب شده و تعداد ضرایب ثابت موجود در آن و همچنین تعداد نمونه های کنترلی دارد، سپس با ساخت نمونه های آزمایشگاهی منطبق با طرح های اختلاط ارائه شده، و حل دستگاه معادلات می توان ضرایب ثابت تابع را محاسبه و رابطه اولیه را کامل نمود، پس از آن با نوشتن روابط محدودیت بر طبق آیین نامه ها و شرایط اجرایی می توان رابطه تابع هدف را با روش های مختلف بهینه سازی نمود. در این میان انتخاب متغیرهای تصمیم تابع هدف و نوع رابطه سازی آن اهمیت زیادی در واقعی بودن جواب های مسأله دارد. توابعی که غالباً در رابطه سازی تابع هدف استفاده می شود به صورت زیر هستند:

$$Y = \sum b_i * X_i + e \quad (1)$$

روش های شناخته شده فعلی نمی توان به صورت قطعی و عددی، بهینه سازی طرح اختلاط بتن را تعیین نمود [۳۹].

تحقیقات و بررسی های انجام شده بر روی بهینه سازی طرح اختلاط بتن، به روش های خطی و غیرخطی بر مبنای متغیرهای تصمیم نسبت حجم یا وزن اجزا تشکیل دهنده بتن به حجم یا وزن کل بتن، تحلیل شده و تابع مقاومت بتن را معرفی کرده اند، لیکن مقادیر یاد شده هیچکدام به تنهایی و مستقیماً رابطه ای با مقاومت بتن ندارند. مثلاً مقدار سیمان و یا آب به صورت جداگانه تأثیر مستقیم بر روی مقاومت بتن ندارد، در حالی که نسبت آب به سیمان با مقاومت فشاری بتن در ارتباط است. لذا در این پژوهش، هدف به دست آوردن تابع و رابطه مقاومت فشاری بتن خودتراکم، با استفاده از متغیرهای تصمیم مناسب و تأثیرگذار بر آن با روش ریاضی بهینه سازی، است.

۲- برنامه تحقیق

بتن خودتراکم شامل اجزای مختلفی است، که با بهینه سازی طرح اختلاط آن می توان با استفاده از بهترین نسبت های اختلاط اجزا به ویژگی های مطلوب دست یافت. استفاده از روش های آیین نامه ای برای محاسبه طرح اختلاط، وقت گیر و پرهزینه است و لازم است حتماً شرایط و فرضیات آیین نامه را برای تمام اجزای تشکیل دهنده بتن رعایت کرد، این مسأله سبب شد، روش های طراحی طرح اختلاط بر مبنای روابط ریاضی بررسی گردد. برای یافتن توابع نزدیک به واقعیت، روش های مختلفی وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد، در این روش ها متغیرهای مختلفی برای توابع بکار رفته است، در این میان استفاده صحیح از متغیرها مهم است و باید از متغیرهایی استفاده شود که با هدف مسأله مرتبط باشد، لذا می توان برای تابع هدف مقاومت فشاری برای بتن خودتراکم، متغیرهای تصمیم را تعیین، با نتایج آزمایشگاهی برازش و سپس با تدوین روابط محدودیت، متغیرها و نسبت های بهینه شده برای طرح اختلاط را محاسبه کرد.

۳- بهینه سازی و روش های آن

بهینه سازی، مجموعه ای از تکنیک ها و روش های برگرفته از علوم ریاضی و البته سایر علوم است که در حل مسائل مختلفی از آن بهره برداری می شود. در بهینه سازی مسائل به صورت سیستمی

$$\frac{1}{\ln} (HRWR) \left(\frac{L}{m^3} \right) = .76 + .31 SCM - .07CA - .11 SCM.CA \quad (4)$$

$$Plastic\ viscosity = 36.2 - 9.6SCM + 2.4CA - 1.4SCM.CA \quad (5)$$

$$\ln(yield\ stress) = 3.4 + .3SCM - .3CA - .2SCM.CA \quad (6)$$

که در روابط بالا SCM مواد پودری، به ترتیب با حداکثر و حداقل مقادیر ۴۲۵ و ۵۲۵ (kg/m³) و CA نسبت درشت دانه، به ترتیب با حداقل و حداکثر ۲۷ تا ۳۳٪ می باشد [۹-۱۱].

ج- سیمپلکس

یک شبکه سیمپلکس نمونه ساختاری از خطوط، که متصل کننده اجزای یک مخلوط مثل اجزای بتن است. برای بتن با توجه به مؤلفه های سازنده آن می توان از شبکه سیمپلکس مؤلفه های مخلوط، از یک چند وجهی سه بعدی متساوی الاضلاع استفاده کرد، که تعداد وجوه آن به تعداد پارامترها بستگی دارد. جمع مؤلفه های مخلوط بنا بر تئوری اسچف برابر یک می باشد.

$$\sum_{i=1}^q X_i = 1 \quad (7)$$

که در آن q تعداد مؤلفه ها و X_i نسبت i امین مؤلفه است. شبکه سیمپلکس (n,q) که توسط Scheffe [۲۳] در سال ۱۹۵۸ معرفی شد، نتیجه رابطه ویژگی مورد نظر مثل مقاومت فشاری بتن را نشان می دهد. چند جمله ای با استفاده از مدلی که با روابط (۱) یا (۲) ارائه شد، معین می گردد. تابع چند جمله ای درجه n با q متغیر X_q X_۱ در فرم زیر داده شده است، که در آن b_i ضریب ثابت است.

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + \dots + \sum b_{i...n} X_i \dots X_n \quad (8)$$

$$1 \leq i \leq q, 1 \leq i \leq j \leq q, 1 \leq i \leq \dots \leq n \leq q$$

با بسط رابطه ۸:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{15} X_1 X_5 + b_{16} X_1 X_6 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + b_{26} X_2 X_6 + b_{34} X_3 X_4 + b_{35} X_3 X_5 + b_{36} X_3 X_6 + b_{45} X_4 X_5 + b_{46} X_4 X_6 + b_{56} X_5 X_6 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{55} X_5^2 + b_{66} X_6^2 \quad (9)$$

$$Y = \sum b_i * X_i + \sum b_{ij} * X_i * X_j + \sum b_{ii} * X_i^2 + e \quad (2)$$

که در ای Z روابط Y تابع هدف مانند مقاومت فشاری یا کارایی و ... می باشد، b_i ضرایب ثابت رابطه، X_i متغیرهای تصمیم و e درصد خطای احتمالی در روابط می باشد.

الف- تاگوچی

نسبت اجزا اختلاط بتن خودتراکم، در ابتدا به صورت نسبت حجمی انتخاب شده و سپس برای اختلاط به نسبت های وزنی تبدیل می گردد. علاوه بر قیودی که روی هر جزء وجود دارد، بخش خمیری بتن (آب، سیمان، میکروسیلیس و فوق روان کننده) می بایست بین ۲۵ تا ۳۵٪ حجم بتن باشد. هر چند هوا در حین اختلاط بتن، وارد آن می شود ولی مقدار آن جزئی از بتن در نظر گرفته نمی شود. در رابطه زیر که به روش تاگوچی برای مقاومت فشاری به دست آمده است، B نسبت آب به مواد سیمانی، C نسبت سنگدانه، D مقدار فوق روان کننده، E مقدار پودر سنگ و F زمان اختلاط به ثانیه می باشد [۲۹].

$$Y = 64.8583 - 1.5092B - 1.8267C - 1.49D + .6188F + 1.9887BC + 1.6963BD + 5.9796D^2 + 2.2113E^2 + 1.407F^2 \quad (3)$$

ب- فاکتوریل

در روش ۲K فاکتوریل، با انتخاب K عامل اختلاط و حدود بالا و پایین برای هر کدام از آنها و سپس قراردادن هر کدام از حدود برای یک پارامتر و حدود دیگر متغیرها در رابطه می توان مقدار بهینه هر جزء را تعیین نمود، لذا این روش خصوصاً در تعداد پارامترهای زیاد دارای محاسبات زیادی بوده و باید از نرم افزار استفاده نمود. در تعیین مقاومت فشاری ماکزیمم، متغیرها مانند مقدار سیمان A، نسبت آب به پودر B، مقدار خاکستر بادی C و مقدار فوق روان کننده D و دیگر پارامترها، لازم است در نظر گرفته شود. روش طراحی فاکتوریل به طور گسترده در آزمایشات شامل تعداد زیادی پارامتر، استفاده می شود. در روش طرح فاکتوریل لازم است که، یک نقطه مرکزی برای کمک به اثرات منحنی درجه ۲ و اجازه برآورد وابسته به خطا، به دست آورده شود.

همچنین رابطه ۷ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}
 b_0 X_1 + b_0 X_2 + b_0 X_3 + b_0 X_4 + b_0 X_5 + b_0 X_6 &= b_0 \\
 X_1^2 &= X_1 - X_1 X_2 - X_1 X_3 - X_1 X_4 - X_1 X_5 - X_1 X_6 \\
 X_2^2 &= X_2 - X_2 X_1 - X_2 X_3 - X_2 X_4 - X_2 X_5 - X_2 X_6 \\
 X_3^2 &= X_3 - X_3 X_1 - X_3 X_2 - X_3 X_4 - X_3 X_5 - X_3 X_6 \\
 X_4^2 &= X_4 - X_4 X_1 - X_4 X_2 - X_4 X_3 - X_4 X_5 - X_4 X_6 \\
 X_5^2 &= X_5 - X_5 X_1 - X_5 X_2 - X_5 X_3 - X_5 X_4 - X_5 X_6 \\
 X_6^2 &= X_6 - X_6 X_1 - X_6 X_2 - X_6 X_3 - X_6 X_4 - X_6 X_5
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

با جایگذاری روابط ۱۰ و ۱۱ در رابطه ۹:

$$Y = \sum_{1 \leq i \leq q} a_i X_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq q} a_{ij} X_i X_j
 \tag{11}$$

$$a_i = b_0 + b_i + b_{ii}
 \tag{12}$$

$$a_{ij} = b_{ij} - b_{ii} - b_{jj}$$

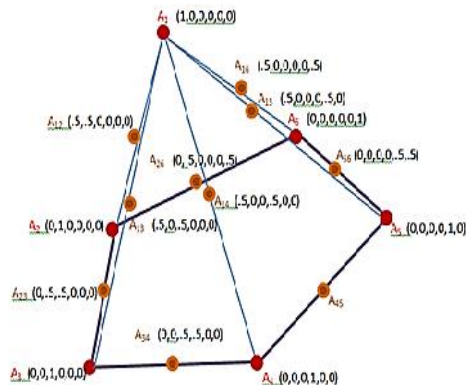
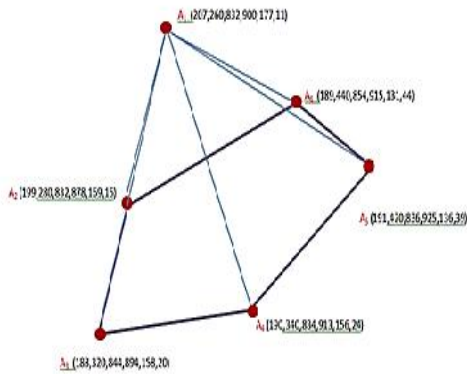
لازم است که یک دگرگونی در اجزای اصلی به اجزای مجازی داده شود. اجزای اصلی با نسبت های اختلاط X_1 تا X_6 با شبکه چندوجهی سیمپلکس بررسی می شوند، رئوس چندوجهی با A_1 تا A_6 بیان می گردد.

$$\begin{aligned}
 f_c' &= 40.848 + 3.100395C - .587366W - \\
 &2.69854FA - 3.19724CA + .544276MS - \\
 &1.93886Fly + .8303IRON + 1.724703VMA
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

یک مدل خطی دیگر برای مقاومت بتن خودتراکم به صورت رابطه ۱۳ بوده و در آن از مقادیر اجزای تشکیل دهنده بتن به کیلوگرم برای به دست آوردن مقدار مقاومت فشاری استفاده شده است [۱۶].

د- منحنی های هم پاسخ

روش رویه هم پاسخ یا RSM از تصویر کردن پاسخ های یک مدل سه بعدی بر محورهای مختصات دوبعدی و تعیین خطوط کانتور با پاسخ های یکسان برای مدل کردن و تحلیل مسائلی که هدف از آنها بهینه سازی پاسخ یک تابع و مقایسه تغییرات پارامترهای آن استفاده می نماید. این روش شامل مجموعه ای از تکنیک های ریاضی و آماری است.



شکل ۱- متغیرهای واقعی و مجازی

رویه پاسخ تابع $Z = f(x, y)$ عبارت است از سطحی که با رسم تابع Z به وجود می آید. معمولاً برای درک بهتر رویه پاسخ ها از منحنی های خط کانتور استفاده می شود. هر خط کانتور مشخص کننده یک ارتفاع خاص از رویه پاسخ است. اولین گام در حل مسأله RSM انتخاب داده ها و سپس به دست آوردن نتایج آزمایشگاهی مربوط به آن داده هاست. گام بعدی، یافتن تقریبی خوب برای ارتباط دادن پاسخ سیستم بر متغیرهای مستقل است. تقریباً در همه مسائل RSM از یکی از مدل های چندجمله ای مرتبه اول یا دوم استفاده می شود:

$$Z = a_0 + a_1 x + a_2 y$$

$$Z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 xy
 \tag{15}$$

چ- روش های پیش بینی (ژنتیک الگوریتم، شبکه عصبی، SVM)

در این روش ها غالباً از یک بانک اطلاعاتی مربوط به نسبت های اختلاط فراوان و آزمایش های لازم انجام شده روی آن استفاده شده و سپس به وسیله نرم افزار تجزیه و تحلیل می شوند، سپس

داده‌های اولیه یک طرح اختلاط جدید را به سیستم معرفی نموده و سیستم با پردازش داده‌های قبلی مقدار تابع هدف، مانند مقاومت فشاری بتن با طرح اختلاط داده شده را به کاربر می‌دهد و سیستم، برای یک طرح معرفی شده، تابع هدف را پیش‌بینی می‌کند.

$$f'_c = -2.1 - 63.8V + .15R + 10.4FM$$

$$S = -448 - 7.17V + 106FM - 8.5T - 674C \quad (13)$$

$$+ 1150W$$

$$C = 0.0431 - 1.32V + 0.000125S + 0.0952FM + 1.57W \quad (14)$$

ب- طرح اختلاط بتن به روش BS:

انتخاب ضریب کنترل و تعیین مقاومت فشاری متوسط، انتخاب اسلامپ، انتخاب بزرگترین بعد سنگدانه، تعیین نسبت آب به سیمان، تعیین نسبت وزنی دانه‌ها، تعیین نسبت وزنی دانه‌ها به سیمان، تعیین وزن اجزا با رابطه حجمی، تصحیح رطوبت [۴۵].

$$FA / Agg = FA / (FA + CA) \quad (16)$$

جدول ۱- دانه‌بندی استاندارد BS

درصد وزنی رد شده از هر الک				اندازه الک‌ها mm
BS 4	BS 3	BS 2	BS 1	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰/۰
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۹-۱۰۰	۵/۰
۸۰-۱۰۰	۶۵-۱۰۰	۶۰-۱۰۰	۶۰-۱۰۰	۲/۳۶
۷۰-۱۰۰	۴۵-۱۰۰	۳۰-۹۰	۳۰-۱۰۰	۱/۱۸
۵۵-۱۰۰	۲۵-۸۰	۱۵-۵۴	۱۵-۱۰۰	۰/۶۰۰
۵-۷۰	۵-۴۸	۵-۴۰	۵-۷۰	۰/۳۰۰
---	---	---	۰/۰-۱۵	۰/۱۵۰

در این روابط f'_c مقاومت فشاری بتن (MP)، V نسبت فضای خالی، R شماره بازسازی، FM مدول نرمی، S جریان اسلامپ (mm)، T زمان اختلاط مصالح (min)، C مقدار سیمان (kg) و W مقدار آب (kg) می‌باشد [۱۰].

۳-۲- استاندارد:

الف- طرح اختلاط به روش ACI-211,237,363:

فرضیات اولیه برای استفاده از این طرح اختلاط به این شرح است: مصالح مصرفی شن و ماسه باید در محدوده ASTM-C33 باشد، وزن مخصوص ظاهری دانه‌ها یا به صورت آزمایشگاهی تعیین شده و یا طبق آیین‌نامه به صورت پیش‌فرض برای شن برابر ۲/۶۸ و برای ماسه ۲/۶۴ فرض شود. همچنین ویژگی‌های دیگر مصالح نیز یا از طریق نتایج آزمایشگاهی تعیین شده و یا از فرض‌های آیین‌نامه استفاده می‌شود به طور مثال چگالی سیمان برابر ۳/۱۵، مدول نرمی ماسه با آزمایش و یا ۲/۸ فرض شود. وزن شن و ماسه براساس حالت اشباع (SSD) با سطح خشک باشد. در پایان لازم است نمونه‌سازی شده و نتایج را در صورت لزوم بررسی و تصحیح کرد. مراحل طرح اختلاط در این روش عبارت است از: تصحیح مقاومت (به روش آماری و استفاده از توزیع نرمال یا استفاده از جداول مربوطه در آیین‌نامه)، انتخاب اسلامپ، انتخاب بزرگترین بعد دانه‌ها، تخمین مقدار آب لازم و هوا (برحسب اسلامپ، بزرگترین بعد سنگدانه و هوادار بودن یا نبودن)، انتخاب نسبت آب به سیمان (براساس مقاومت مورد نیاز و شرایط محیطی)، محاسبه مقدار سیمان، تعیین مقدار درشت‌دانه (CA) با استفاده از مدول نرمی و بزرگترین بعد سنگدانه، تعیین مقدار ریزدانه (FA) به دو روش وزنی و یا حجمی [۴۲-۴۴].

ج- طرح اختلاط به روش آبا:

تعیین انحراف معیار برای مقاومت، تعیین نسبت آب به سیمان (براساس مقاومت بتن و مقاومت فشاری سیمان و نوع دانه)، انتخاب منحنی سنگدانه، تعیین مقدار آب آزاد بتن (براساس روانی، شکل سنگدانه‌ها، حداکثر بعد سنگدانه و مدول نرمی ماسه)، تعیین مقدار سیمان (فاکتور K لحاظ گردد)، تعیین مقدار سنگدانه [۴۶-۴۷].

۳-۳- بهینه‌سازی خطی

۳-۳-۱- متغیرهای تصمیم:

نسبت اجزا اختلاط که در مقاومت نقش مؤثری دارند، به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه رابطه آب به سیمان و مواد چسبنده پزولانی به صورت غیرخطی با رابطه معکوس به مقاومت فشاری مرتبط است، لذا برای خطی شدن رابطه تابع هدف، از معکوس این نسبت‌ها که رابطه خطی با

مقاومت دارد، استفاده کردیم. این نسبت ها که به عنوان متغیرهای تصمیم بهینه سازی استفاده شدند، عبارت از سیمان به آب (X_1)، مواد چسبنده پوزولانی به آب (X_2)، ریزدانه به مواد پودری (X_3)، درشت دانه به مواد پودری (X_4)، میکروسیلیس به مواد چسبنده (X_5) و سیمان به مواد چسبنده (X_6) هستند.



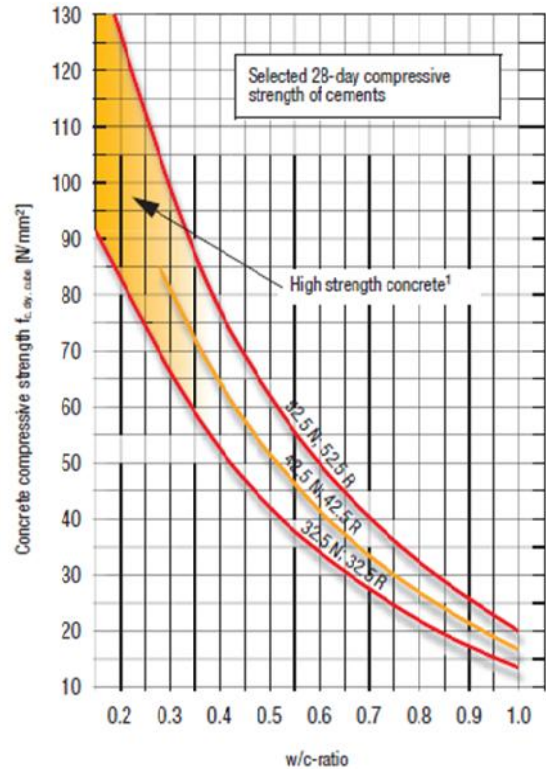
شکل ۳- آزمایش حلقه J بتن خودتراکم در آزمایشگاه

Structuro100 بر پایه تکنولوژی مخلوط پلی کربوکسیلیک، اصلاح کننده لزجت (VMA)، از مواد سیمانی مانند پودر خاک سنگ، GGBFS و میکروسیلیکا با چگالی ویژه $1/65 \text{ gr/cm}^3$ تشکیل شده و محدوده معمول آن ۱ تا 4 lit/m^3 و از آب معمولی آشامیدنی استفاده شد.

۵- ساخت نمونه، برازش نتایج و ضرایب تابع هدف: در مجموع ۱۷ طرح اختلاط با نسبت های آب به مواد پودری متغیر ساخته شد.

جدول ۲- مقادیر متغیرهای تصمیم

متغیر تصمیم شماره طرح	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
۱	۱/۱۳	۱/۱۷	۲/۱	۱/۹	۰/۰۳	۰/۹۷
۲	۱/۲۵	۱/۳	۲	۱/۸۵	۰/۰۴	۰/۹۶
۳	۱/۴	۱/۴۷	۱/۹	۱/۸	۰/۰۵	۰/۹۶
۴	۱/۵۳	۱/۶۱	۱/۸۵	۱/۷۵	۰/۰۵۵	۰/۹۵
۵	۱/۶۹	۱/۷۸	۱/۸	۱/۷	۰/۰۶	۰/۹۵
۶	۱/۷۸	۱/۹	۱/۷۵	۱/۶۵	۰/۰۶۵	۰/۹۴
۷	۱/۸۸	۲/۰۴	۱/۷	۱/۶	۰/۰۷	۰/۹۳
۸	۱/۹۸	۲/۱۵	۱/۶۵	۱/۵۵	۰/۰۷۵	۰/۹۲
۹	۲/۰۸	۲/۲۷	۱/۶	۱/۵	۰/۰۸	۰/۹۲
۱۰	۲/۱۹	۲/۴	۱/۵۵	۱/۴۵	۰/۰۸۵	۰/۹۲
۱۱	۲/۳۲	۲/۵۶	۱/۵	۱/۴	۰/۰۹	۰/۹
۱۲	۲/۱۴	۲/۲۸	۱/۱	۱/۹۶	۰/۰۶	۰/۹۴
۱۳	۱/۳	۱/۱۴	۱/۶	۲/۳۸	۰/۰۷۶	۰/۹۲
۱۴	۲/۷۷	۲/۹۵	۰/۷۸	۱/۴۱	۰/۰۶	۰/۹۴
۱۵	۱/۹	۲/۰۶	۱/۲۸	۱/۱۸	۰/۰۷۲	۰/۹۲
۱۶	۲/۱۸	۲/۳۴	۱/۲۸	۱/۳۹	۰/۰۶۶	۰/۹۳
۱۷	۱/۹	۱/۵۵	۱/۶۴	۲/۰۳	۰/۰۷۵	۱/۲



شکل ۲- منحنی رابطه نسبت آب به سیمان و

مقاومت فشاری [۴۷]

۳-۲- تابع هدف:

در مدل سازی ریاضی از چند جمله ای خطی با ضرایب ثابت، برای متغیرهای تصمیم معرفی شده، انتخاب می شود.

$$(17)$$

در رابطه ۱۷، Y مقاومت فشاری، b_i ضرایب ثابت هستند.

۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از سیمان تپ ۱ با مقاومت ۵۲/۵ مگاپاسکال با مشخصات جدول (۳،۴) مصالح سنگی با مشخصات جدول (۵) و مدول نرمی ۲/۴۸ استفاده شد.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_{act} - y_{pre})^2}{(n-p)}} \quad (20)$$

$$S = 1.52$$

شماره	مقاومت	طراحی	واقعی	رابطه (۱۹)	تراکم	سیمپلکس	فاکتوریل	شبکه عصبی	اسلامپ mm
۱	۳۰	۳۲	۳۲	۳۹	۴۳	۳۸	۳۸/۵	۶۵	
۲	۳۵	۳۴	۳۹/۵	۳۷	۴۲/۵	۳۶/۱	۳۷/۵	۶۳	
۳	۴۰	۳۵	۳۵	۴۵/۵	۴۹/۳	۴۷/۴	۴۶/۱	۶۰	
۴	۴۵	۴۱	۴۹/۳	۵۲	۵۱/۸	۵۵/۲	۵۳/۸	۶۰	
۵	۵۰	۴۵	۴۵	۵۵/۳	۵۹/۱	۵۶/۷	۶۲	۶۰	
۶	۵۳	۴۶	۵۵/۲	۶۲/۳	۶۵/۸	۶۱/۱	۶۳/۲	۶۱	
۷	۵۵	۵۰	۵۰	۶۵/۵	۶۷/۱	۶۶/۳	۶۰/۵	۶۱	
۸	۵۷	۵۵	۵۲/۲	۶۸/۲	۶۳/۱	۶۶/۲	۶۷/۸	۶۱	
۹	۶۰	۵۵	۵۵	۶۹/۱	۶۷/۸	۶۸/۴	۶۵/۹	۶۲	
۱	۶۵	۵۷	۵۷/۲	۷۲/۳	۷۱/۸	۷۵/۵	۷۳/۱	۶۳	
۱	۷۰	۶۰	۶۰	۷۸/۳	۷۷/۸	۷۱/۲	۷۶/۵	۶۴	
۱	۶۰	۵۱	۴۹	۶۹/۸	۶۷/۴	۶۸	۶۶/۳	۶۲	
۱	۴۰	۳۶	۳۲/۵	۵۰/۲	۴۸/۳	۴۵/۶	۴۶/۷	۶۱	
۱	۶۰	۵۳	۵۰	۷۰/۳	۶۸/۱	۶۸/۸	۶۷/۹	۶۳	
۱	۴۰	۳۱	۲۹	۵۳	۵۱/۲	۴۶/۵	۴۸/۲	۶۲	
۱	۶۰	۵۰	۴۸/۵	۷۲/۲	۶۹/۸	۶۸/۲	۶۶(۳۰)	۶۴	
۱	۴۰	۳۳	۳۸/۵	۵۱/۳	۵۰	۵۲	۴۹/۱	۶۱	

جدول ۶ - مقایسه نتایج تابع هدف با نتایج واقعی MPa

در جدول ۶ مقادیر مقاومت به دست آمده از رابطه (۱۹) با مقاومت‌های به دست آمده از روش‌های مختلف دیگر ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج رابطه (۱۹) با دقت مناسبی، نزدیکتر از روش‌های دیگر به نتایج واقعی می‌باشد. همچنین رابطه (۲۰) مقدار انحراف از معیار نتایج رابطه (۱۹) با نتایج آزمایشگاهی واقعی را ارائه داده است که در آن $y_{pre} - y_{act}$ به ترتیب مقاومت فشاری به دست آمده از رابطه و آزمایشگاه و تعداد طرح‌های اختلاط و p تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشد.

۶- روابط محدودیت تابع هدف:

برای تکمیل مدل بهینه‌سازی نیاز به تعریف روابط محدودیت می‌باشد که از شرایط و دستورات آیین‌نامه‌ای استخراج شده و به صورت روابط ریاضی به مدل معرفی شده اعمال می‌گردد. جداول ۷ تا ۹ محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای مربوط به مقادیر اجزای بتن را ارائه می‌دهند.

آزمایشات مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ سانتی متر مکعبی، انجام و در مخزن آب نگهداری و با یک ماشین تست فشاری، آزمایش شد. کارایی بتن خودتراکم با استفاده از آزمایش جریان اسلامپ استاندارد اروپایی، به دست آمد.

جدول ۳ - نتایج آزمایشگاهی سیمان تیپ ۱

وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۱۴
سطح مخصوص (cm ² /gr)	۳۸۵۳
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	۲۱/۳
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	۵۲/۵
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۸۵
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۴۰

جدول ۴ - محتویات سیمان

ترکیبات شیمیایی سیمان	مقدار (درصد)
CaO	۶۳
SiO ₂	۲۱
Al ₂ O ₃	۵/۵
Fe ₂ O ₃	۳/۱
MgO	۲/۷
SO ₃	۱/۹
K ₂ O	۰/۶۵
Na ₂ O	۰/۲۵

جدول ۵ - نتایج آزمایشگاهی سنگدانه‌ها

فیلر	ماسه	نخودی	بادامی	
وزن مخصوص	۲/۱۴۹	۲/۳۲۵	۲/۲۳۷	۲/۰۷
وزن مخصوص ظاهری	۲/۱۵۵	۲/۳۳۷	۲/۳۳۵	۲/۱
جذب آب	٪۳/۱	٪۱	٪۱	٪۳

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و به دست آوردن مقاومت فشاری و اسلامپ واقعی نمونه‌ها، پاسخ‌ها و نسبت‌های اختلاط استفاده شده در ساخت نمونه‌ها را در رابطه تابع هدف قرار داده و با حل دستگاه معادلات درجه اول، ضرایب ثابت را به دست آمد. حال با توجه به ضرایب به دست آمده، رابطه بازنویسی می‌شود:

$$Y = 529.67 + 20.12x_1 - 2.62x_2 - 15.85x_3 + 32.14x_4 - 2.1107x_5 - 558.94x_6 + e \quad (19)$$

$$Y = 529.67 + 20.12x_1 - 2.62x_2 - 15.85x_3 + 32.14x_4 - 2.1107x_5 - 558.94x_6 + e$$

s. to:

$$529.67 + 20.12x_1 - 2.62x_2 - 15.85x_3 + 32.14x_4 - 2.1107x_5 - 558.94x_6 + e \geq n$$

$$x_1 \geq 2.084$$

$$1.15 \leq x_3 \leq 3.21$$

$$1.25 \leq x_4 \leq 2.631$$

$$x_5 + x_6 = 1$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \geq 0$$

(21)

با استفاده از جدول سیمپلکس و یا نرم افزارهای حل مسائل بهینه سازی مانند، Lingo, Lindo, Matlab ... می توان تابع بالا را به همراه محدودیت های عنوان شده، تحلیل و پاسخ های متناظر را استخراج نمود.

۷- تحلیل نتایج

در طرح اختلاط بتن به روش ACI به مقاومت سیمان به عنوان یکی از اجزای مهم بتن که نقش مؤثری در این ترکیب را دارد، پرداخته نشده است، که این مسأله می تواند موجب ایجاد خطا در طراحی گردد. همچنین در استفاده از آن باید انطباق مصالح مصرفی مانند سیمان، سنگدانه، منحنی دانه بندی و ... را با پیش فرض های مطرح شده در آیین نامه بررسی نمود.

با توجه به اینکه در استانداردهای آبا و ACI برای محاسبه میزان آب از مقاومت بتن استفاده ای نشده است، میزان آب به دست آمده ارتباطی به مقاومت نداشته و برای هر دو مقاومت ۴۰ و ۶۰ میزان آب، یکسان به دست آمده است، ولی در استاندارد BS در تعیین میزان آب، مقاومت طراحی متوسط بتن در نظر گرفته می شود و مقادیر به دست آمده برای دو مقاومت مختلف متفاوت هستند.

آیین نامه آبا نمودار آب به سیمان و مقاومت را برای مقاومت های بالا ارائه نکرده است، بنابراین برای این تحقیق از نمودار (۲) منطبق بر استاندارد DIN آلمان استفاده شد. در این نمودار مقاومت سیمان بر مقاومت بتن مؤثر بوده و می توان با استفاده از آن خطای ایجاد شده در روش ACI را کاهش داد. تأثیر نسبت آب به سیمان و آب به مواد چسبنده بر مقاومت بتن زیاد است، در حالی که درصد فوق روان کننده تأثیر مستقیم

جدول ۷- مقادیر پیشنهادی کمیته اروپایی در سال ۲۰۰۵ برای

طرح مخلوط بتن خودتراکم

وزنی kg/m ^۳	حجمی lit/m ^۳	
	۳۰۰-۳۸۰	پودر
۱۵۰-۲۱۰	۱۵۰-۲۱۰	خمیر
۷۵۰-۱۰۰۰	۲۷۰-۳۶۰	آب
		سنگدانه درشت
		سنگدانه ریز
		سنگدانه ها
	۰/۸۵-۱/۱	آب به پودر

جدول ۸- اجزا اختلاط و محدوده نسبت حجمی به کل

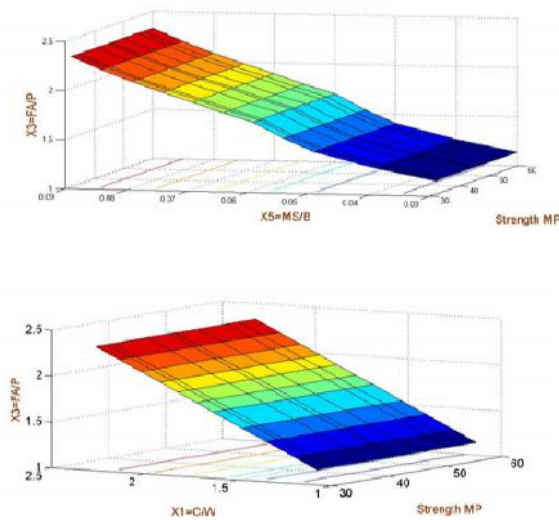
مقدار ماکزیمم	مقدار مینیمم	جز ترکیبی
۰/۱۸۵	۰/۱۶	آب
۰/۱۵	۰/۱۳	سیمان
۰/۰۲۷	۰/۰۱۳	میکروسلیس
۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۴۶	روان کننده
۰/۴۴۲۴	۰/۴	سنگدانه درشت
۰/۲۹۲۴	۰/۲۵	سنگدانه ریز

جدول ۹- محدوده نسبت های حجمی اجزا

مقدار ماکزیمم	مقدار مینیمم	جز ترکیبی [۲۱]
۱/۶	۰/۶	آب به سیمان
۰/۷	۰/۳	آب به مواد چسبنده
۰/۰۴	۰/۰۱۳	فوق روان به چسبنده
۰/۵۵	۰	خاکستر بادی به چسبنده
۶/۴	۲/۷	سنگدانه به چسبنده
۰/۵۲	۰/۴	ریزدانه به کل سنگدانه
۵۰۰	۳۵۰ Kg	مقدار سیمان [۲۹]
۰/۳۹	۰/۳	آب به مواد سیمانی
۰/۷	۰/۶	نسبت سنگدانه
۱/۵	۱ Kg	فوق روان کننده
۱۵۰	۸۰ Kg	مقدار خاکستر بادی
۱۲۰	۱۰۰	زمان اختلاط ثانیه

بازنویسی تابع هدف مقاومت فشاری n مگاپاسکال بتن خودتراکم و محدودیت ها بر مبنای توصیه های آیین نامه ای:

در شرایط آب به سیمان یکسان، می توان با فراهم کردن شرایط مناسب برای کارایی و جریان اسلامپ مورد انتظار



شکل ۴- منحنی رابطه متغیرهای تصمیم با مقاومت

مانند استفاده از فوق روان کننده ها و مواد پودری از مصالح سنگدانه ای شکسته استفاده کرد.

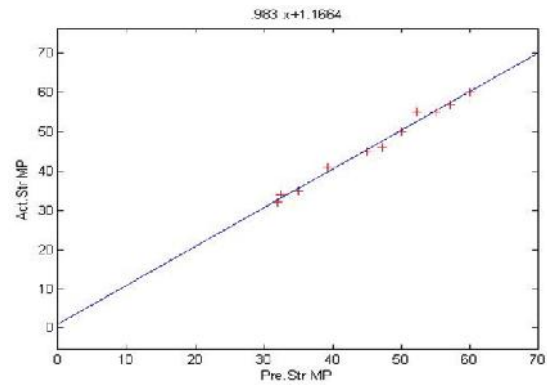
همانطور که در نمودارهای (۴ و ۶) دیده می شود، علی رغم رابطه غیرخطی و معکوس نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت فشاری بتن، رابطه سیمان به آب و مقاومت، رابطه ای خطی و مستقیم است، این مسأله در مورد رابطه نسبت های مواد آب به سیمان و آب به مواد پودری با مقاومت سیمان نیز با شیب تغییرات کمتر، صدق می کند. لذا فرض خطی بودن این رابطه برای ارائه تابع هدف منطقی بوده و می توان از این رابطه خطی برای تعیین دیگر خصوصیات انواع بتن استفاده کرد. همچنین مشخص می شود که با توجه به شیب منحنی های مربوط، حساسیت نسبت مواد چسبنده پوزولانی به آب در مقایسه با سیمان به آب و مواد پودری به آب بر تغییرات مقاومت فشاری بتن بیشتر است. توجه به این امر می تواند در تعیین دقیق تر نسبت های اجزای مختلف مواد پودری با توجه به ویژگی های مورد نظر بتن، در طرح اختلاط به طراح کمک کند.

همانطور که مشاهده شد، رابطه متغیرهای انتخاب شده با مقاومت فشاری با تقریب بسیار خوبی خطی بوده که با روش انجام شده مبتنی بر رابطه سازی خطی تابع هدف با متغیرهای تصمیم، مطابقت دارد، در نمودارهای زیر مقادیر واقعی مقاومت برای تغییر در هر کدام از متغیرهای تصمیم شش گانه با نقاط منقطع

چندانی بر مقاومت ندارد. همچنین با افزایش مقدار نسبت پودر سنگ به مواد سیمانی، مقاومت تحت تأثیر قرار گرفته و کم می شود. استفاده از میکروسیلیس می تواند به افزایش مقاومت کمک کند، اما باعث افزایش قیمت تولید یک مترمکعب بتن نیز می گردد. با کاهش میزان آب به سیمان مقاومت افزایش می یابد، ولی کارایی بسیار کم می شود و گاهی بتن قابل استفاده نیست. برای ایجاد کارایی از فوق روان کننده استفاده می شود. استفاده از فوق روان کننده نیز باعث افزایش هزینه تولید می شود. در ساخت بتن با مقاومت های بالا گرچه استفاده از افزودنی ها به هزینه ساخت می افزاید، اما موارد استفاده از مقاومت بالای بتن این مسأله را توجیه می کند.

همانطور که در نمودار (۲) دیده می شود، مقاومت سیمان نیز یکی از عوامل مؤثر بر مقاومت بتن است، به طوری که با افزایش مقاومت سیمان از ۳۲/۵ به ۴۲/۵ MP (با اختلاف قیمت ناچیز) در نسبت آب به سیمان ۰/۱۸ حدود ۶۰٪ افزایش مقاومت بتن را شاهد خواهیم بود. از طرف دیگر، در حالی که برای تولید بتن با مقاومت ۵۰ MP نسبت آب به سیمان برای سیمان ۵۲/۵ برابر ۰/۶ است، این نسبت برای سیمان های ۴۲/۵ و ۳۲/۵ به ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۴ می باشد. قابل توجه است که افزایش نسبت آب به سیمان باعث کارایی بیشتر می شود و بنابراین برای تولید بتن با مقاومت مشخص استفاده از سیمان با مقاومت بالاتر به ما این اجازه را می دهد که با نسبت آب به سیمان بالاتری طرح اختلاط ارائه شود و به تبع آن کارایی بیشتر شده و میزان مصرف فوق روان کننده کاهش می یابد، کاهش مصرف فوق روان کننده باعث کاهش یا حتی عدم مصرف VMA نیز می گردد. لذا با توجه به قیمت بالای فوق روان کننده و تفاوت ناچیز قیمت تحویل سیمان با مقاومت های مختلف در کارگاه، استفاده از سیمان با مقاومت بالا برای استفاده در بتن پر مقاومت باعث صرفه جویی اقتصادی خواهد شد. شرایط استفاده از بتن خودتراکم غالباً ایجاب می کند برای به دست آوردن کارایی بهتر از سنگدانه های گردگوشه استفاده کنیم، اما این مسأله مطابق با نمودارهای آیین نامه آبا منجر به کاهش مقاومت بتن می شود، به طوری که مطابق نمودار (۲) در سیمان با مقاومت ۵۲/۵ استفاده از سنگدانه های گردگوشه نسبت به سنگدانه های شکسته مقاومت را در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ حدود ۲۰٪ کاهش می دهد. بنابراین برای حصول مقاومت بالاتر

مختلف طرح اختلاط که قبلاً بررسی شده است، مشاهده می گردد که نتایج استفاده از تابع خطی با متغیرهای تصمیم ارائه شده در این تحقیق به نتایج نمونه های آزمایشگاهی واقعی نزدیکتر بوده و درصد خطای آن کمتر است. دلیل اصلی این مسأله این است که در توابعی که در تحقیقات گذشته گزارش شده است بر مبنای نسبت حجمی و یا وزنی اجزای تشکیل دهنده بتن به کل آن می باشد و دلیل آن استفاده از توابع آماری مرتبط در این زمینه مانند رابطه (۲) که به عنوان رابطه Scheffe [۲۳] شناخته شده است و شرط اصلی برای استفاده از آن این است که باید مجموع پارامترهای انتخاب شده برای تابع، واحد باشد و با انتخاب نسبت های مذکور این شرط برآورده می گردد. در حالی که معرفی متغیرهای تصمیم به صورت نسبت حجمی و یا وزنی اجزای تشکیل دهنده بتن به کل آن، رابطه تابع هدف را با مقاومت به درستی بیان نمی کند، چون هر یک از نسبت ها، به عبارت دیگر، عیار هر جزء تشکیل دهنده بتن رابطه مستقیمی با مقاومت ندارد، اما در تابع معرفی شده در این تحقیق از متغیرهای تصمیمی استفاده شده است که با تابع هدف یعنی مقاومت فشاری روابط مستقیم داشته و بر روی مقاومت تأثیرگذار هستند و این امر باعث نزدیک شدن پاسخ ها به نتایج واقعی و آزمایشگاهی شده است.



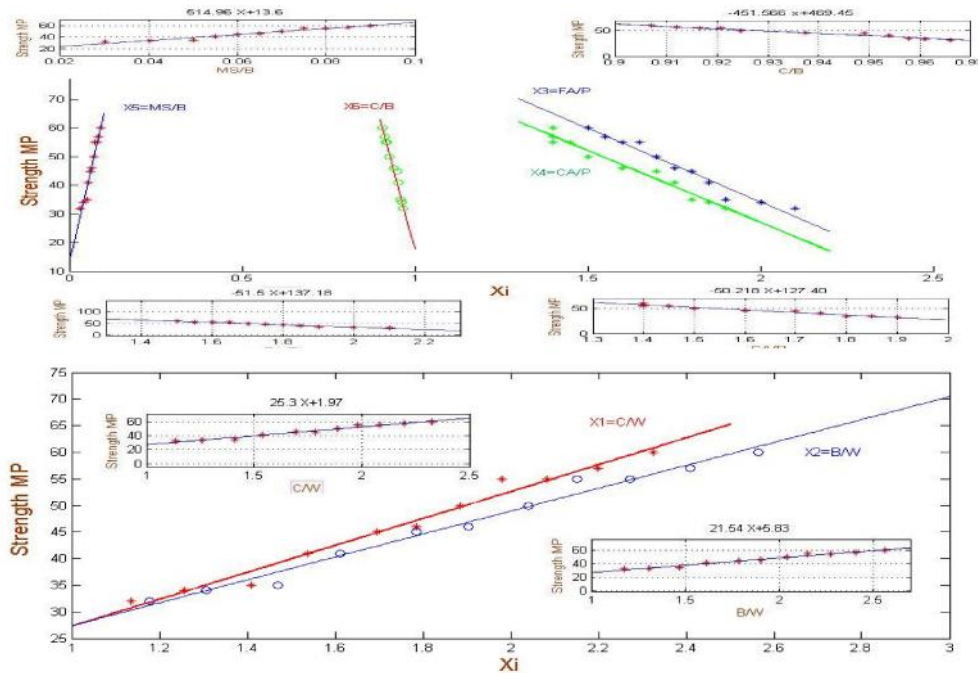
شکل ۵- رابطه مقاومت فشاری واقعی با نتایج رابطه ۱۹

ستاره ها نتایج ترسیم و سپس با برازش نتایج نزدیکترین رابطه به این پاسخ ها استخراج و با خط مشخص شده است، دیده می شود که انحراف نقاط از خط ترسیم شده بسیار کم بوده و رابطه ها خطی هستند.

همچنین نمودار ارزیابی بین مقاومت های واقعی و ارائه شده توسط رابطه تابع هدف در شکل زیر نشان می دهد که رابطه ارائه شده با قابلیت اعتماد مناسبی، می تواند مقاومت فشاری طرح اختلاط را محاسبه نماید.

نتیجه گیری:

با توجه به روابط به دست آمده و مقایسه نتایج بین روش های



شکل ۶- روابط بین متغیرها و مقاومت فشاری بتن خودتراکم

۸- مراجع

- SCC", *Construction and Building Materials* 37, 699–706, 2012.
- [12]. Dvorkin, L., Bezusyak, A., Lushnikova, N., Ribako, Y., "Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture", *Construction and Building Materials* 37 851–864, 2012.
- [13]. Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P.M., Coutinho, J.S., Figueiras, J., "A methodology to assess robustness of SCC mixtures", *Cement and Concrete Research* 36, 2115–2122, 2006.
- [14]. Shakhmenko, G., Brish, J., "Concrete Mix Design and Optimization", 2nd Int. PHD Symposium in Civil Engineering, Budapest, 1998.
- [15]. Patton, G.M., Shariatmadafi, A., Hansomt, R. G. "Efficiency in aggregate mix design: a "least squares" method", *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 1 I, Number 3, 1989.
- [16]. Raharjo, D., Subakti, A., "Mixed Concrete Optimization Using Fly Ash, Silica Fume and Iron Slag on the SCC's Compressive Strength", *Procedia Engineering* 54 827 – 839, 2013.
- [17]. Sivilevicius, H., Podvezko, V., Vakriniene, S., "The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture", *Construction and Building Materials* 25, 115–122, 2011.
- [18]. Fennis, S., "Design of self compacting concrete by particle packing optimization", 2009.
- [19]. Khokhar, M.I.A., Roziere, E., Turcry, P., Grondin, F. and Loukili, A., "Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength", *Cement & Concrete Composites* 32, PP377–385, 2010.
- [20]. Cheng Yeh, I., "Computer-aided design for optimum concrete mixtures", *Cement & Concrete Composites* 29 193–202, 2007.
- [21]. Ahmadi-Nedushan, B., Varace, H., "Minimum Cost Design of Concrete Slabs using Particle Swarm Optimization with time Varying Acceleration Coefficients", *World Applied Sciences Journal* 13 (12): 2484-2494, ISSN 1818-4952, 2011.
- [22]. Cannon, J. P., Krishna Murti, G. R., "Concrete Optimized Mix Proportioning (COMP)", *Cement and Concrete Research*. Vol. I, pp. 353-366., Pergamon Press, Inc Printed in the United States, 1971.
- [23]. Okere, C.E., Onwuka, D.O., Onwuka, S.U., Arimanwa, J.I., "Optimisation of concrete mix cost using Scheffe's simplex lattice theory", *Journal of Innovative*
- [1]. Onwukaa, D.O., Okerea, C.E., Arimanwaa, J.I., Onwukab, S.U., "Prediction of concrete mix ratios using modified regression theory", *Comp. Meth. Civil Eng*, Vol. 2 No. 1 pp. 95-107, 2011.
- [2]. Okere, C.E., Onwuka, D.O., Onwuka, S.U., Arimanwa, J.I., "Simplex-Based Concrete Mix Design", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684 Volume 5, Issue 2, PP 46-55, 2013.
- [3]. Onwuka, D.O., Okere, C.E., Ibearugbulem, O.M., Onwuka, S.U., "Computer-Aided Design of Concrete Mixes", *International Journal of Computational Engineering Research (ijceronline.com)* Vol. 3 Issue, 2.
- [4]. Ilinoiu, G., "Concrete Mix Design Optimized Approach", *Dimensi Teknik Sipil* Vol 6, NO. 1, Maret 2004: 49 – 56, 2004.
- [5]. Alabi, S.A., Olanitori, L.M., Afolayan, J.O., "Optimum Mix Design for Minimum Concrete Strength Requirement Using Akure Pit-sand as Fine Aggregate", *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)* 3 (4): 718-724, ISSN: 2141-7016, 2012.
- [6]. Alqadi, A.N.S., Mustapha, K.N.B., Naganathan, S., Al-Kadi, Q.N.S., "Development of self compacting concrete using contrast constant factorial design", *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 25, 105–112, 2013.
- [7]. Murthy, K.N., Rao N.A.V., Reddy, R., Reddy, V.V.S.M., "Mix Design Procedure for Self Compacting Concrete", *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)* e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, Volume 2, Issue 9, PP 33-41, 2012.
- [8]. Aggrawal, P., Siddique, R., Aggrawal, Y., Gupta, S.M., "Self-Compacting Concrete-Procedure for Mix Design", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, ISSN 1583-1078, p. 15-24, 2008.
- [9]. Sonebi, M., "Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans", *Cement and Concrete Research* 34, 1199–1208, 2004.
- [10]. Mohammed, M.H., Pusch, R., Al-Ansari, Knutsson, N.S., "Optimization of Concrete by Minimizing Void Volume in Aggregate Mixture System", *Journal of Advanced Science and Engineering Research* Vol 2, No 3, 208-222, 2012.
- [11]. Yahia, A., Khayat, H.K., Sayed, M., "Statistical modelling of the coupled effect of mix design and rebar spacing on restricted flow characteristics of

- [34]. Haidar, M., Ghorbel, E., Toutanji, H., "Optimization of the formulation of micro-polymer concretes", *Construction and Building Materials* 25, 1632–1644, 2011.
- [35]. Güneyisi, E., Gesog, M. and Alginlu, Z., Mermerdas, K., "Optimization of concrete mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method", *Composites: Part B* 60, 707–715, 2014.
- [36]. Naik, T.R., Kumar, R., Rammeb, B.W., Canpolat, F., "Development of high-strength, economy- ical self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials* 30, 463–469, 2012.
- [37]. Pathak, N., Siddique, R., "Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand", *Construction and Building Materials* 34, 512–521, 2012.
- [38]. Lian, C., Zhuge, Y., "Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation", *Construction and Building Materials* 24, 2664–2671, 2010.
- [39]. Odigure, J.O., "Optimization of cement mortar strength from raw mix containing metallic particles", *Cement and Concrete Research* 31, 51-56, 2001.
- [40]. Ravindran, A., Gintaras V. R., Kenneth, M. R., "Engineering optimization: Methods and applications", John Wiley & Sons, 2006.
- [41]. Haftka, R. T., "Elements of structural optimization", Vol. 11. Springer, 1992.
- [42]. ACI-237R-07, Reported by American Concrete Institute (ACI), Committee 237, 2007.
- [43]. ACI-2114R-08, Reported by American Concrete Institute (ACI), Committee 211, 2008.
- [44]. ACI-363-R-92, Reported by American Concrete Institute (ACI), Committee 363, 1997.
- [45]. British Standards Institution (BSI), c. BS 206-1:2000 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. London, BSI, 2006.
- [۴۶]. قدوسی، پ. و همکاران. " روش ملی طرح مخلوط بتن "، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [47]. Bicher, B., Schwoon, O., Schlumpf, J., "Sika Concrete Handbook", Sika Services AG, 2013.
- Research in Engineering and Sciences 4(1), ISSN : 2141-8225 (Print); ISSN : 2251-0524, 2013.
- [24]. Garbali ska, H., Kowalski, S.J., Staszak, M., "Linear and non-linear analysis of desorption processes in cement mortar", *Cement and Concrete Research* 40, 752–762, 2010.
- [25]. Abdelgader, H.S., "How to design concrete produced by a two-stage concreting method", *Cement and Concrete Research* 29, 331–337, 1999.
- [26]. Mebrouki, A., Belas, N., Bouhamou, N., "Experimental Planslans Method to Formulate a Self-Compacting Cement Paste", *MTAEC9*, 44(1)13, ISSN 1580-2949, 2010.
- [27]. Bouziani, T., "Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach", *Construction and Building Materials* 49, 308–314 2013.
- [28]. Sua, N., Hsu, K.C., Chai, H.W., "A simple mix design method for self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 31, 1799–1807, 2001.
- [29]. Bari, S., Tansel ç, Y., im ek, E.H., "A TOPSIS-based Taguchi optimization to determine optimal mixture proportions of the high strength self-compacting concrete", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 125, 18-32, 2013.
- [30]. 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* 23, 694–702, 2009.
- [31]. Ayan, E., Saatçioğlu, Ö., Turanlı, L., "Parameter optimization on compressive strength of steel fiber reinforced high strength concrete", *Construction and Building Materials* 25, 2837–2844, 2011.
- [32]. Muthukumar, M., Mohan, D., Rajendran, M., "Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments", *Cement & Concrete Composites* 25, 751–758, 2003.
- [33]. Prasad, B.K.R., Eskandari, H., Reddy, B.V.V., "Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN", *Construction and Building Materials* 23, 117–128, 2009.

Optimum Mix Design of Self Consolidating Concrete Modeling

H. Eskandari**

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar
A. Pakzad

M.Tech. Student of Structural Engineering, Pardis of Hakim Sabzevari University, Sabzevar
M. Tayebinia

Faculty Member, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar

(Received: 2014/5/28 - Accepted: 2015/3/3)

Abstract

Utilization of Self consolidating concrete in construction industry has been increased due to flow ability that causing more speed and better quality of execution. Optimization mix design methods of self-consolidating concrete can reduce expenses and therefore the application of that will be increase at construction project.

In this study, different methods of mix design optimization have been reviewed which can be applicable for self-consolidating concrete mix design as well as different mathematical mix designs have been compared that can be useful to optimized mix design for high strength self-consolidating concrete. In addition, with studying objective function, decision variables and its constraint parameters in concrete's mix design such as (cement, sand, water, super-plasticizer and powder materials), have been determined.

Results showed that the optimized design of high strength self-consolidating concrete's mix design is dependent on the objective function, its constraints and other parameters of constitutive materials ratio such as water/ cement ratio, cement/fine aggregate, cement/ coarse aggregate, cement/super plasticizer.

Keywords: self-consolidating concrete, optimization, cement, Compressive Strength.

* Corresponding author: Hamidiisc@yahoo.com

تحقیقات بتن، سال ششم، شماره دوم /