کانون ملی معماری ایران
همایش ملی معماری، عمران و توسعه ی نوین شهری
تبریز - اردیبهشت ۱۳۹۳

مدل‌سازی و بررسی بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن فروسیمان

حمید اسکندری*[۱]، محمد عظیمی پور[۲]

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، *Hamidiisc@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، Mohammadazimipour@gmail.com

چکیده

امروزه استفاده از بتن فروسیمان در اعضای ساختمانی و عمرانی پیش ساخته رو به افزایش بوده و همچنین با توجه به وجود پارامترهای مختلف تاثیرگذار در طراحی این نوع بتن، داشتن توجیه اقتصادی این مصالح امری اجتناب ناپذیر می باشد. برای این منظور یکی از مهمترین مشخصه‌های این نوع بتن طرح اختلاط آن می‌باشد. با توجه به اینکه پارامترهای گوناگونی در طراحی فروسیمان دخیل هستند و ملات آن نیز یکی از ارکان این نوع بتن می‌باشد، لذا بهینه‌سازی این نوع ملات می‌تواند تاثیرات مثبتی بر خواص و هزینه‌های آن داشته باشد. در این مطالعه ضمن بررسی خصوصیات فروسیمان مورد کاربرد در این گونه سازه ها، انواع روش های آماری برای مدل و بهینه سازی بتن و ملات فروسیمان مورد بررسی قرار گرفت و همچنین طرح اختلاط آن با کمک یک تابع هدف مناسب مدل‌سازی شد. و صحت مدل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: بتن، فروسیمان، مدل‌سازی، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

فروسیمان نوعی بتن مسلح می‌باشد که با نوع معمولی تفاوت دارد. به عبارت دیگر فروسیمان از ملات سیمانی و چندین لایه از شبکه‌های فلزی نسبتاً نازک فشرده شده و متصل به هم و میلگردهای باقطر نازک ساخته می‌شود ملات سیمانی علاوه بر ایجاد پوششی برای شبکه‌های فلزی و پرکردن شکاف‌های ما بین شبکه ها، باعث استحکام قطعه نیز می‌شود. امروزه با توجه به پیشرفت روز افزون صنعت بتن، بتن و ملات فروسیمان مورد توجه محققین این امر قرار گرفته است. ملات فروسیمان از کارایی نسبتا بالایی برخوردار بوده [۱] و نیز دارای سرعت اجرای بالا می‌باشد [۲]. فروسیمان با توجه به قابلیت‌های بالای خود نظیر درجات زبری مختلف، شکل‌پذیری، دوام، مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر ترک خوردگی، بیشتر از انواع دیگر بتن هایی که در ساخت و ساز به کار می روند، دارای کاربرد های متنوعی است [۳]. به طور معمول از ملات فروسیمان علاوه بر تعمیرات، در صنعت قایق سازی، منابع آب، انبار غله، لوله ها، سقف خانه ها و کارگاه ها استفاده می‌شود [۴]. از فروسیمان در ساخت خانه های ارزان قیمت نیز استفاده می‌شود [۵]. با توجه به این مهم که استفاده از ملات فروسیمان در سازه‌های امروزی کاربرد بالایی دارد، می‌بایست طرح اختلاط آن از لحاظ اقتصادی و همچنین نسبت های مختلف استفاده از مصالح، بهینه شده و به مشخصات مکانیکی مطلوبی نزدیک شود. در عرصه‌ی بتن، تحقیقات زیادی در مورد اعضا و ملات فروسیمان صورت گرفته از جمله در سال ۱۳۸۹ در مورد تاثیر ذرات نانو بر عملکرد ملات و المان‌های فروسیمان و کاربرد نانوذرات سیلیس به عنوان یک سوپرپوزولان ملات های مورد کاربرد در فروسیمان، به بررسی رفتار این مواد در ساختار ملات‌های ویژه مورد نظر پرداخته‌شده است. نتایج حاصل نشان داد، استفاده از ذرات نانو تا حدودی روند کسب مقاومت را افزایش می‌دهد [۷].

شکل۱: نمونه هایی از کاربرد فروسیمان در سازه ها [۶]

همچنین می‌توان به تحقیقاتی در مورد خصوصیات مکانیکی فروسیمان اشاره کرد، که با افزایش لایه‌های سیمی می‌توان مقاومت خمشی فروسیمان را افزایش داد [۸].

در سال ۲۰۱۰ توسط محققان مالزی، مطالعاتی بر روی بهینه‌سازی ملات با کارایی بالا صورت گرفت، این مطالعه در دو مرحله آزمایشگاهی انجام شد: در مرحله اول ۲۰ نمونه با نسبت های مختلف سیمان به ماسه (۱:۲، ۱:۲.۲۵، ۱:۲.۵، ۱:۲.۷۵) و نسبت آب به سیمان (۰.۵-۰.۴) و در مرحله دوم ۸ نمونه با نسبت سیمان به ماسه (۱:۲.۵، ۱:۲.۷۵) و نسبت آب به سیمان (۰.۴۲۵-۰.۳۵) و برای رسیدن به اسلامپ ۹۰-۵۰ میلی متری از فوق روان‌کننده استفاده شده است. مقاومت نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه طبق آیین نامه استاندارد انگلیس مورد آزمایش قرار گرفت و محدوده‌های مناسب طرح اختلاط برای ملات با کارایی بالا بدست آمد [۹]. در سال ۲۰۰۱ در ضمینه بهینه‌سازی مخلوط ملات سیمان و مواد خام حاوی ذرات فلزی تحقیقاتی به عمل آمد. در این مطالعه در ملات سیمان از مصالحی همچون آهک و سرباره‌ی آهن‌گدازی استفاده شده و به کمک آنالیز سیمپلکس طرح اختلاط آن را بهینه کرد. در پایان کار معادله رگرسیون توسعه یافته‌ای برای تعیین مقاومت فشاری ملات سیمان که کمتر از یک درصد مواد خام را شامل می‌شود، نوشته شد و مشخصات ملات را به کمک آن اصلاح کرد [۱۰].

در سال ۲۰۰۳ طی تحقیقاتی نسبت اختلاط بهینه بتن بدست آمد [۱۱]. آنها با کمک مدل‌سازی طرح اختلاط با کمترین هزینه ارائه دادند. در بررسی آنها مقاومت و کارایی بتن توسط قیدهایشان مدل‌سازی شد و برای سادگی کار از نرم افزار CMOP استفاده نمودند. در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش منحنی‌های هم‌پاسخ، طرح اختلاط بهینه بتن‌های خودمتراکم با مقاومت بالا را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. با استفاده از این روش، در این مطالعه آنها برنامه‌های تجربی را برای بهینه‌سازی چهار جزء اصلی بتن محتوی خاکستر بادی برای شش معیار ارائه دادند. مدل ارائه شده توسط آنها توانایی شناسایی طرح اختلاط بهینه بتن و همچنین درصد بهینه مصرف هر یک از مواد مضاف را برای دستیابی به مقاومت مشخص شده، دارد . در سال ۲۰۰۹ بهینه‌سازی با چند تابع هدف برای بتنهای با مقاومت بالا با استفاده از روش تاگوچی انجام شد [۱۳]. آنها در یک رتبه‌بندی میزان و اثر هر یک از نسبتها را بر روی بتن خودمتراکم با مقاومت بالا در حالت‌های تازه و سخت شده نشان دادند. در سال ۲۰۰۳ از الگوریتم ژنتیک در نسبت اختلاط بتن با کارایی بالا استفاده شد [۱۴]. آنها با توجه به مزایای فراوان این نوع بتن‌ها و در نظر گرفتن این نکته که رسیدن به کارایی مورد نظر در آنها نیاز به استفاده از مخلوطهای آزمایشی برای انتخاب ترکیب مورد نظر دارد، روش جدیدی برای طرح اختلاط بتن با کارایی بالا به منظور کاهش مخلوطهای آزمایشی پیشنهاد دادند. در این تحقیقات، بررسی‌های تجربی و تحلیلی برای بسط روش طراحی و بازبینی طرح اختلاط پیشنهادی انجام گرفت.

همانطور که در بالا اشاره شد تا به امروز مطالعات زیادی در مورد بتن و ملات فروسیمان و تاثیر انواع افزودنی ها بر خواص مکانیکی آن انجام شده است و همچنین چندین مدل سازی در مورد اعضای فروسیمانی صورت گرفته است. اما تا به امروز مطالعه و بررسی بر روی طرح اختلاط بتن و ملات فرو سیمان صورت نگرفته است. در این پژوهش ضمن معرفی و بررسی روش هاری آماری کاربردی و تعریف تابع هدف مناسب به منظور بهینه سازی طرح اختلاط آن، روش مناسبتر نیز پیشنهاد شده است.

۲- معرفی روش های آماری

به طور کلی روش های آماری بهینه سازی به دو صورت خطی و غیر خطی صورت می پذیرد.

۲-۱- بهینه سازی خطی

برنامه‌ریزی خطی، یا همان بهینه‌سازی خطی، روشی در ریاضیات است که به پیدا کردن مقدار کمینه یا بیشینه از یک تابع خطی روی یک چندضلعی محدب می‌پردازد این چندضلعی محدب در حقیقت نمایش نموداری تعدادی محدودیت از نوع نامعادله روی متغیرهای تابع است. به بیان ساده‌تر به وسیله برنامه‌سازی خطی می‌توان بهترین نتیجه (مثلاً بیشترین مقاومت یا کمترین هزینه) را در شرایط خاص و با محدودیت‌های خاص به دست آورد. معادله خطی زیر را می توان برای حل مسائل بهینه سازی خطی استفاده کرد.

$$f(x_i) = \sum a_i x_i + a_0 + e \quad (1)$$

$$g_j(x_i) = \sum a_{ij} x_i \leq 0 \quad (2)$$

$$g_j(x_i) = \sum a_{ij} x_i \geq 0 \quad (3)$$

۲-۲- بهینه سازی غیر خطی

با توجه به اینکه میزان مصالح تشکیل دهنده بتن و ملات فروسیمان با یکدیگر و مقاومت رابطه‌ی غیرخطی دارند بایستی برای بهینه‌سازی طرح اختلاط آنها از روش‌های بهینه‌سازی که تابع هدفشان به صورت غیرخطی می باشند استفاده کرد. معادله اولیه غیرخطی و محدودیت‌هایی را که می‌شود برای بهینه‌سازی غیرخطی تعریف کرد بصورت زیر می باشد.

$$Max(Min) f(x_i) \quad (4)$$
$$s.to$$
$$g_1(x_i) > b_1$$
$$g_2(x_i) > b_2$$
$$g_3(x_i) > b_3$$

که در معادله های بالا b_1, b_2 و b_3 محدودیت های تابع هدف می باشند.

روش های مرسوم بهینه سازی غیر خطی در علم مهندسی به شرح زیر می باشد.

۲-۲-۱ روش تاگوچی

روش طراحی آزمایشات در سال ۱۹۶۰ توسط پروفسور تاگوچی معرفی گردید. این روش می‌تواند با کمترین تعداد آزمایشات ، شرایط بهینه را تعیین کند و باعث کاهش چشمگیر زمان و هزینه انجام آزمایشات مورد نیاز گردد. فلسفه تاگوچی در سه مفهوم اصلی و ساده بنا نهاده شده است:

کیفیت باید هنگام تولید طراحی گردد، نه اینکه در طی فرآیند ساخت محصول بررسی شود.

محصول باید طوری طراحی گردد که در برابر فاکتورهای محیطی غیر قابل کنترل، ایمن باشد.

هزینه کیفیت باید به صورت تابع انحراف از حالت استاندارد اندازه‌گیری شده و ضرر و زیانها در عرض سیستم سنجیده شود.

به طور کلی در طراحی آماری یک آزمایش باید مراحل زیر را طی کرد:

۱- شناسایی عوامل تاثیر گذار و متغیر پاسخ ۲- تعیین محدوده مناسب برای متغیرهای تاثیرگذار ۳- تعیین ساختار طراحی و آزمایش آن ۴- جمع آوری داده ها و منظم کردن آنها ۵- سازماندهی نتایج به منظور نتیجه گیری مناسب.

در روش تاگوچی با طرح یک تابع هدف(scheffe) و تخصیص دادن پارامتر های موثر مدل به ضرایب تابع هدف، تابع هدف را کامل کرده و با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری آماری، می‌توان تابع هدف را به صورت‌های مختلف (ماکزیمم یا مینمم) تحلیل کرده و مجهولات تابع هدف را بدست آورد.تابع scheffe برای n پارامتر به صورت زیر تعریف می شود.

$$y = \sum_{k=0}^{n} b_0 + \sum_{i=0}^{n} b_i x_i + \sum_{i=0}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=0}^{n} b_{ijk} + x_i x_j x_k + \sum_{i=0}^{n} bi_1 i_2 \dots i_n x i_1 x\, i_2 \dots x i_n \qquad (5)$$

که در آن هدف، b_{ij} و b_{ijk} ضرایب محدودیت ها و x_i و x_j متغیر ها و محدودیت‌ها می‌باشد.

۲-۲-۲ روش سیمپلکس

زمانی که طرح اختلاط مورد نظر دارای چند جزء باشد از روش بهینه سازی براساس تئوری سیمپلکس scheffe استفاده می‌شود، که این اجزا به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می شوند(X_i)، شرطی که scheffe در تئوری خود بیان نمود بیانگر $\sum_{i=1}^{q} X_i = 1$ (q تعداد ترکیبات طرح اختلاط) می‌باشد، به عبارت دیگر مجموع متغیرها برابر با یک در نظر گرفته می شود.

تابع هدف در این تئوری به شکل $Y = b_0 + \sum_{i=1}^{q} b_i X_{i+} \sum_{i=1}^{q} b_{ij} X_i X_j$ تعریف شده که در آن Y تابع هدف مساله است که اکسترمم آن مورد نظر طراحی می باشد و b_i ضرایب ثابت در نظر گرفته می‌شوند[۲۷].

در سال ۲۰۱۳ محققان نیجریه طرح اختلاط بتن را با روش سیمپلکس بهینه کردند. آنها با استفاده از تابع هدف scheffe و تئوری روش سیمپلکس مجموع نسبت های وزنی اجزا بتن را به کل برابر ۱ قرار داده و با کمک جدول سیمپلکس ضرایب تابع هدف را بدست آوردند. تابع هدف برای مقاومت ۲۸ روزه بدست آمده و با آزمایش بر روی چند طرح اختلاط، صحت نمونه ارائه شده را نشان دادند [۱۵].

۲-۲-۳ روش فاکتوریل

تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) یک روش آماری است که برای بررسی و مدل کردن رابطه‌ی بین یک متغیر پاسخ و یک یا چند متغیر مستقل است.

یکی از روش های طراحی آماری روش فاکتوریل کامل می باشد. در این روش با بزرگ کردن حساسیت آزمایش، تاثیر عوامل موثر بر نتیجه خروجی آزمایش را مورد مطالعه قرار می دهد. معمولا روش فاکتوریل کامل از ۲^k (k متغیر های تاثیر گذار بر متغیر پاسخ می باشد) فاکتور برای طراحی استفاده می‌کند که به طور گسترده‌ای در صنعت برای به حداکثر رساندن خروجی‌های حاصل از ورود منابع اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای شناسایی مهم‌ترین فاکتور ممکن، مورد استفاده قرار می گیرد.

در سال ۲۰۰۱ روش فاکتوریل برای بهینه‌سازی ملات سیمان گروت مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه مقدار سیمان ملات بوسیله پودر خاکستر با درصدهای مختلف جایگزین شده و با مدل سازی به روش فاکتوریل طرح اختلاط بهینه از نظر مقاومت برای تولید ملات سیمان گروت جایگزین شده با پودر خاکستر بدست آمد [۱۶].

۲-۲-۴ روش منحنی های هم پاسخ

روش رویه‌ی پاسخ (RSM) برای مدل کردن و تحلیل مسائلی که هدف از آن، بهینه‌سازی پاسخ یک تابع است، به کار می‌رود که این روش شامل مجموعه‌ای از تکنیک های ریاضی و آماری است.

روش رویه‌ی پاسخ که اولین بار در تحقیقات کشاورزی و سپس در شیمی و مهندسی شیمی مورد استفاده قرار گرفت، می‌تواند به عنوان ابزار بسیار مفیدی در تکنولوژی بتن بخصوص تصمیم‌گیری در مورد طرح اختلاط آن، مورد استفاده قرار بگیرد [۱۷]. استفاده از این روش در طرح اختلاط بتن تقریبا از سال ۱۹۹۴ رواج یافت.

برای مقایسه‌ی سه نوع میکروسیلیس با قیمت های مختلف از نظر اقتصادی از روش رویه‌ی هم‌پاسخ استفاده شده است. منحنی‌های هم پاسخ را برای قیمت یک متر مکعب بتن نسبت به دو متغیر نسبت آب به مواد سیمانی و میزان آب رسم شده است [۱۷].

طی تحقیقاتی برای بررسی تاثیر پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری ملات و همچنین بهینه‌سازی طرح اختلاط ملات از نظر مقاومت و قیمت از روش رسم کانتوری استفاده کردند و نتایج خود را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۱۸].

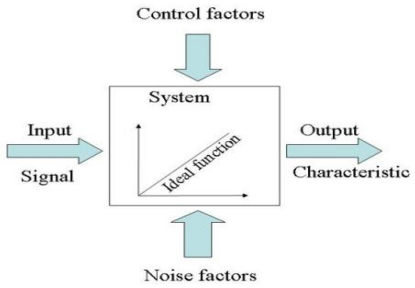
۴-تحلیل و تجزیه روشهای بهینه سازی

تاگوچی دو روش متفاوت برای انجام و کامل کردن تحلیل پیشنهاد می کند:

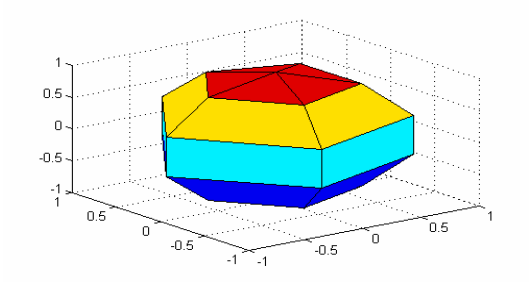
روش استاندارد، که در آن نتیجه یک موقعیت آزمایش و یا میانگین نتیجه بدست آمده از تکرار یک موقعیت آزمایش به واسطه اثر عمده و ANOVA پردازش می‌شود.

روش دوم که تاگوچی می تواند برای آزمایشات همراه با تکرار توصیه شود، استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای مراحل یکسان در تحلیل است. این تحلیل با استفاده از تغییرات نتایج، بهترین و قویترین شرایط کاری را تعیین می کند.(این نسبت پراکندگی حول یک مقدار مشخصه را بیان می‌کند هر چه نسبت فوق بیشتر باشد پراکندگی کمتر خواهد بود.)

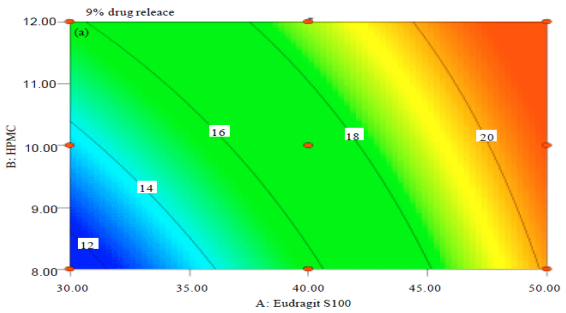
روش سیمپلکس مشابه روش تاکوچی عمل کرده با این تفاوت که تحلیل تابع با کمک جدول سیمپلکس و یا نرم افزار های تحلیل سیمپلکس انجام می‌شود. برای تحلیل داده‌های مدل‌سازی به روش فاکتوریل بایستی ۲^k (k تعداد پارامتر های موثر بر تابع هدف) آزمایش صورت پذیرد، سپس به کمک آزمایشات، محدوده‌هایی برای پارامتر ها مشخص کرده و با قرار دادن حدود بالا و پایین بازه‌ها در تابع هدف، مقدار ماکزیمم و مینیمم آن را بدست می‌آورد که برای مدل‌هایی که دارای پارامترهای بیش از ۴ باشد، به کار آزمایشگاهی و محاسباتی زیادی نیاز دارد. روش منحنی‌های هم پاسخ می‌تواند (با توجه روش حل) برخلاف سه روش دیگر مستقل از تعداد پارامتر ها باشد و تعداد آزمایش مورد نیاز آن با تغییر تعداد متغیر ها کمتر تغییر کند، در واقع تلاش عمده‌ی این روش مربوط به قسمت تحلیل آن می‌باشد تا انجام آزمایش. برای توضیح بیشتر در مورد این روش فرض کنید تابع دو متغیره ی Z به صورت $Z = f(x,y)$، تعریف شده باشد، در این صورت به x و y متغیر مستقل و Z پاسخ تابع گفته می شود. رویه‌ی پاسخ عبارت است از سطحی که با رسم $Z = f(x,y)$ به وجود می‌آید. برای اینکه بتوان رویه‌ی پاسخ را بهتر تصور کرد و از آن در مسائل کاربردی استفاده کرد، معمولا کانتور های رویه‌ی پاسخ به جای آن رسم می‌شود. کانتورها یا منحنی های هم پاسخ، خطوطی هستند، که دارای پاسخ یکسان اند. هر خط کانتور مشخص کننده‌ی یک ارتفاع خاص از رویه‌ی پاسخ است [۲۳]. در نگاه اول روش منحنی هم پاسخ به دلیل اینکه مستقل از تعداد پارامتر ها و مجهولات است، مناسب ترین روش برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی به نظر می رسد، اما مشکل اصلی این روش در تحلیل داده‌هاست. روش منحنی هم‌پاسخ نهایتا تاثیر سه پارامتر را به طور هم زمان بررسی می‌کند و هرچه تعداد پارامترهای یک مدل بیش از ۳ باشد، نتایج حاصل از تحلیل این روش علاوه بر پیچیده‌تر شدن، اعتبار کمتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد. از مهمترین مزیت‌هایی که می‌توان برای روش تاکوچی و سیمپلکس برشمرد. در پارامتر های بالا علاوه بر سریع بودن و راحت‌تر بودن تغییرات تمام پارامتر ها و وابستگی آنها را به طور هم زمان مقایسه می‌گردد. فروسیمان از پارامترهای نسبتا زیادی تشکیل شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده مطالب قبل تشخیص داده می‌شود که روش تاگوچی و سیمپلکس برای بهینه‌سازی فروسیمان نسبت به روش های دیگر مناسب تر می باشد. برای بهینه سازی فروسیمان با روش فاکتوریل برای رسیدن به نتایج مطلوب بایستی آزمایشات نسبتا زیادی انجام شود. در روش منحنی‌های هم‌پاسخ با توجه به اینکه پارامتر های فروسیمان معمولا بیش از ۵ پارامتر است، تحلیل منحنی های هم‌پاسخ دشوار بوده و نتایج حاصله از آن به نسبت تاگوچی و سیمپلکس از واقعیت دورتر است. همچنین برای مقایسه روشن تر می توان بصورت شماتیک به شکل ۲ اشاره نمود.

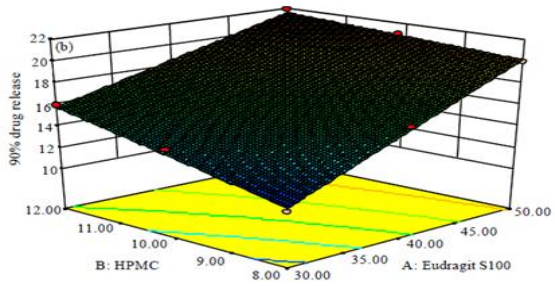


الف) روش تاکوچی [۱۹]

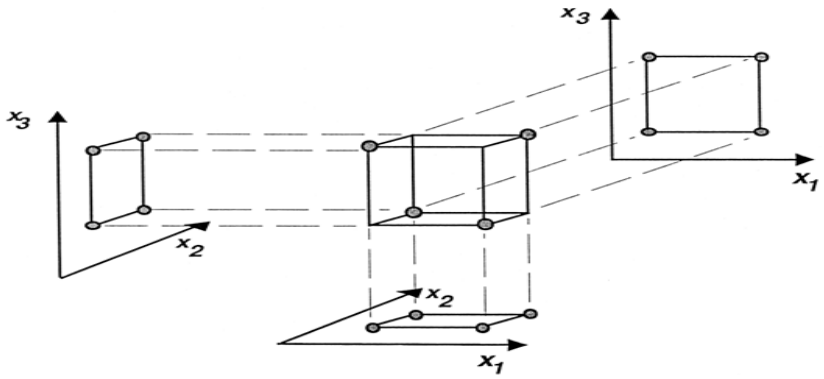


ب) سیمپلکس [۲۰]





ج) منحنی های هم پاسخ [۲۱]



د) فاکتوریل [۲۲]

شکل ۲: تصویر شماتیکی از انواع روش ها

۵- طرح اختلاط بتن فروسیمان با روش آبا:

با توجه به اینکه در آیین نامه آبا طرح اختلاط بر اساس خصوصیات شن و درصد شکستگی آن ها می باشد با در نظر گرفتن بعضی فرضیات و تغییرات از این روش برای محاسبه طرح اختلاط ملات فروسیمان استفاده کردیم. این طرح اختلاط را برای سه نوع سیمان با مقاومت های مختلف ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ مگاپاسکال و در دو حالت شکسته و گردگوشه بودن سنگدانه‌ها انجام دادیم که در جدول‌های ۱ الی ۳ ارائه شده‌اند.

جدول۱-طرح اختلاط سیمان ۳۲۵

ماسه (Kg/M^3)	سیمان (Kg/M^3)	آب (Kg/M^3)	نسبت فوق روان کننده به سیمان(٪)	مقاومت (MPa)	نوع ماسه	شماره
۱۳۵۰	۵۲۸	۲۷۷	۰	۲۰	گرد گوشه	۱
۹۹۹	۸۶۴	۳۱۱	۰	۳۰	گرد گوشه	۲
۱۵۲۰	۴۴۲	۲۳۴	۰.۵	۲۰	گرد گوشه	۳
۱۲۶۰	۶۷۶	۲۶۳	۰.۵	۳۰	گرد گوشه	۴
۱۳۸۱	۴۹۳	۲۷۶	۰	۲۰	شکسته	۵
۱۱۰۰	۷۳۴	۳۱۲	۰	۳۰	شکسته	۶
۱۴۲۷	۵۲۷	۲۴۲	۱	۲۰	شکسته	۷
۱۳۹۵	۵۶۱	۲۴۴	۱	۳۰	شکسته	۸
۱۲۱۸	۷۲۶	۲۶۱	۱	۴۰	شکسته	۹

جدول ۲- طرح اختلاط سیمان ۴۲۵

ماسه (Kg/M^3)	سیمان (Kg/M^3)	آب (Kg/M^3)	نسبت فوق روان کننده به سیمان(%)	مقاومت (MPa)	نوع ماسه	شماره
۱۴۵۲	۴۵۲	۲۶۰	۰	۲۰	گرد گوشه	۱
۱۳۰۴	۵۹۶	۲۷۴	۰	۳۰	گرد گوشه	۲
۱۵۲۱	۴۸۲	۲۲۴	۱	۴۰	گرد گوشه	۳
۱۴۲۲	۴۴۶	۲۷۴	۰	۲۰	شکسته	۴
۱۲۸۱	۵۸۱	۲۸۸	۰	۳۰	شکسته	۵
۱۱۴۶	۷۰۴	۳۰۳	۰	۴۰	شکسته	۶
۱۶۲۷	۳۶۲	۲۲۱	۱	۲۰	شکسته	۷
۱۵۰۳	۴۷۶	۲۳۳	۱	۳۰	شکسته	۸
۱۳۸۶	۵۸۳	۲۴۵	۱	۴۰	شکسته	۹

جدول ۳- طرح اختلاط سیمان ۵۲۵

ماسه (Kg/M^3)	سیمان (Kg/M^3)	آب (Kg/M^3)	نسبت فوق روان کننده به سیمان(%)	مقاومت (MPa)	نوع ماسه	شماره
۱۵۴۵	۳۹۵	۲۴۷	۰	۲۰	گرد گوشه	۱
۱۴۰۴	۵۰۸	۲۶۷	۰	۳۰	گرد گوشه	۲
۱۲۰۷	۶۸۳	۲۹۰	۰	۴۰	گرد گوشه	۳
۹۸۳	۷۸۴	۳۴۱	۱	۴۰	گرد گوشه	۴
۱۳۱۸	۶۶۴	۲۴۵	۱	۵۰	گرد گوشه	۵
۱۴۸۰	۴۰۷	۲۶۹	۰	۲۰	شکسته	۶
۱۳۷۴	۴۹۹	۲۸۲	۰	۳۰	شکسته	۷
۱۲۵۵	۶۱۵	۲۹۲	۰	۴۰	شکسته	۸
۹۳۶	۹۲۲	۳۲۲	۰	۵۰	شکسته	۹
۱۵۸۵	۳۹۹	۲۳۲	۱	۳۰	شکسته	۱۰
۱۵۰۸	۴۹۰	۲۳۵	۱	۴۰	شکسته	۱۱
۱۳۹۸	۶۰۱	۲۴۸	۱	۵۰	شکسته	۱۲

مدول نرمی کلیه‌ی طرح اختلاط‌ها برابر با کمترین حالت ممکن یعنی برابر با ۳.۲۷ فرض شده است. در برخی طرح اختلاط‌ها برای رسیدن به مقاومت بالا و روانی بیشتر از فوق روان کننده در محاسبات استفاده شده است. مقدار شن موجود در ملات برابر صفر فرض شده است. وزن مخصوص سیمان برابر ۳.۱۵ و وزن مخصوص ماسه برابر ۲.۵ و وزن مخصوص آب برابر ۱ در نظر گرفته شد است.

۶- مدل سازی طرح اختلاط

به منظور مدل‌سازی طرح اختلاط فروسیمان، برای سیمان با مقاومت ۵۲۵، ۱۲ طرح اختلاط برای مقاومت‌های ۲۰،۳۰،۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال نوشته شد. اگر فرض کنیم سه پارامتر متغیر داشته باشیم (وزن آب، سیمان و ماسه) تابع هدف آن را به صورت زیر می توان نوشت:

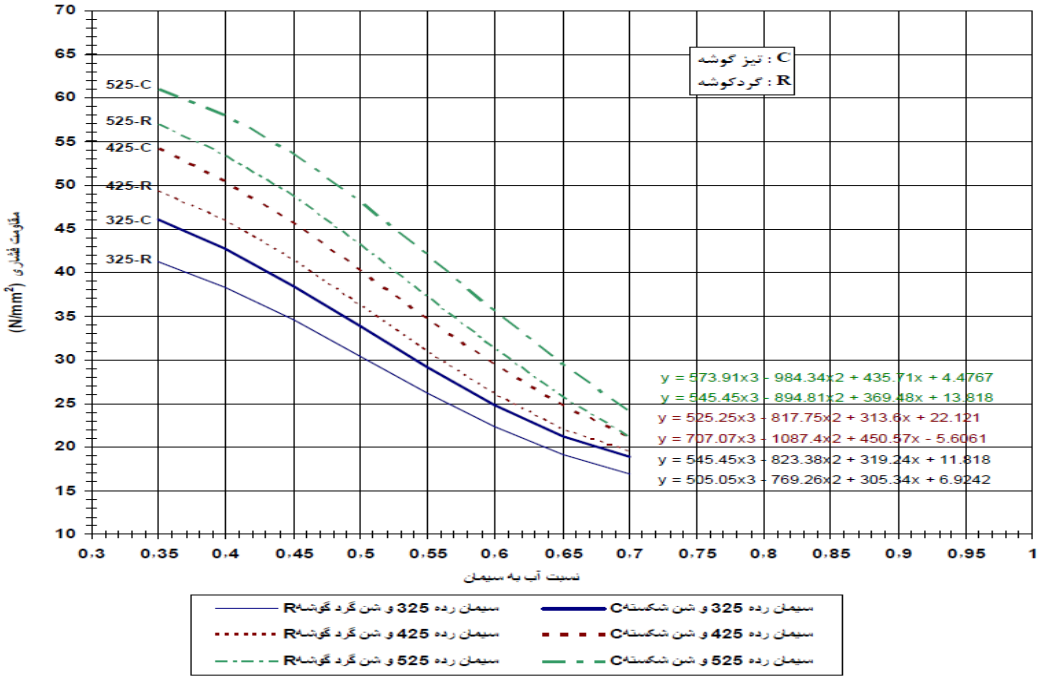
$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}{x_1}^2 + b_{22}{x_2}^2 + b_{33} \quad (6)$$

که در تابع هدف، y بیانگر مقاومت، x_1 وزن آب ، x_2 وزن سیمان و x_3 وزن ماسه می‌باشد. محدودیت‌های متغیرهای تابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

وزن آب: $۲۴۰ < x_1 < ۳۵۰$ با توجه به نمودار ۱ طرح اختلاط آبا و مصرف فوق روان کننده و مقاومت فشاری مورد نظر، نسبت‌های آب به سیمان مختلف را ارائه داده است.

وزن سیمان: $۳۹۰ < x_2 < ۹۰۰$

وزن ماسه : $۹۰۰ < x_3 < ۱۶۰۰$ مدول نرمی ریز دانه طبق آبا کمترین مقدار ممکن در نظر گرفته شده است.



نمودار۱: رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بدون مصرف روان کننده[۲۳]

با توجه به اینکه تابع هدف نوشته شده دارای ۹ ضریب ثابت می‌باشد بنابراین با داشتن میزان وزن آب، سیمان و ماسه در ۹ طرح اختلاط مختلف می‌توان ضرایب ثابت تابع هدف را از حل یک ضرب ماتریسی بدست آورد و برای بررسی صحت ضرایب و تابع هدف، و می‌توان مقاومت سه طرح اختلاط آخر را با دادن وزن آب، ماسه و سیمان به تابع هدف با تقریب خوبی پیش بینی کرد. ضرایب بدست آمده به صورت زیر می باشد.

$$y = 42.2x_1 - 43.7x_2 + 13.5x_3 + .02x_1x_2 - .03x_1x_3 + .013x_2x_3 - .0342{x_1}^2 + .0143{x_2}^2 - .005{x_3}^2$$

برای نشان دادن صحت تابع هدف، وزن آب، ماسه و سیمان بدست آمده از طرح اختلاط های ۱۱،۱۰ و ۱۲ را وارد تابع هدف کرده و برای طرح اختلاط ۱۰ مقاومت ۳۳.۳ مگاپاسکال، برای طرح اختلاط ۱۱مقاومت ۴۱ مگاپاسکال و برای طرح اختلاط ۱۲ مقاومت ۴۸ مگاپاسکال بدست آمد. که نتایج نشان می دهد تابع هدف نوشته شده برای سیمان با مقاومت ۵۲۵ تقریب نسبتا خوبی را دارا می باشد.

۷- نتیجه گیری

با توجه به روش های ارائه شده، برای محاسبه ضرایب تابع هدف روش‌های فاکتوریل و منحنی‌هم‌پاسخ نسبت به روش‌های تاگوچی و سیمپلکس به نمونه‌های آزمایشگاهی بیشتری نیاز می‌باشد. با کمک روش تاگوچی و سیمپلکس می‌توان با یک تابع هدف مناسب تعداد آزمایشات را کاهش داد و تاثیر تغییر هریک از پارامترها را بر پارامترهای دیگر بررسی کرد و نتایج مشابهی با روشهای دیگر بدست آورد. انتخاب صحیح متغیرهای تصمیم و تابع هدف و همچنین محدودیت‌ها کمک زیادی در حل مسائل فروسیمان خواهد داشت. در این بررسی به منظور اثبات صحت تابع هدف ارائه شده، ثابت های تابع هدف (b_i) را برای سیمان با مقاومت ۵۲۵ محاسبه شد و پاسخ آن با سه طرح اختلاط با مقاومت‌های مختلف بررسی شد. تابع هدف ارائه شده را می توان با یکی از روش‌های تاگوچی یا سیمپلکس بهینه کرد و میزان بیشترین مقاومت را برای آن بدست آورد.

مراجع

[1] Sasiekalaa, K. Malathy, R. A Review Report On Mechanical Properties Of Ferrocement With Cementitious Materials. International Journal of Engineering, 1(9) (2012).

[2] Naaman AE. Ferrocement laminated cementitious composites. Ann Arbor. Techno Press 3000, p. 372, Michigan, (2000).

[3] Memon, N. A. Sumadi, S. R. Ferrocement: a versatile composite structural material-a review. Research Journal of Engineering & Technology, 25(1), 9-14. Mehran University, (2006).

[4] Booshehrian, A. Hosseini, P. Effect of nano-SiO2 particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements. Concrete Research Letters, 2(1), 167-180, (2011).

[5] Mattone R. Ferrocement in low cost housing: an application proposal (use of ferrocement in rural housing project). Journal of Ferrocement 22(2):181 7. (1992).

[6] Naaman, A.E. Evolution in Ferrocement and Thin Reinforced Cementitious Composites. Arab J Sci Eng (2012) 37:421–441, (2012).

[۷] خالو، ع. حسینی، پ. بوشهریان، ع. توسعهٔ ساخت المانهای کم ضخامت سازهای با بهرهگیری از نانو ذرات SiO_2. مجله تحقیقات بتن، سال سوم، شماره ۲، زمستان، (۱۳۸۹).

[8] Shannag, j.M. Ziyyad. T. B. Flexural response of ferrocement with fibrous cementitious matrices. Construction and Building Materials, 21(6), 1198-1205, (2007).

[9] Ban, C. C. Ramli, M. Optimization of mix proportion of high performance mortar for structural applications. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(4), 643, (2010).

[10] Odigure, J. O. Optimization of cement mortar strength from raw mix containing metallic particles. Cement and concrete research, 31(1), 51-56, (2001).

[11] Cannon, J. P., Murti, k. G. R. Concrete optimized mix proportioning (COMP). Cement and Concrete Research, 1(4), 353-366, (1971).

[12] Murali, T. M. Kandasamy, S. Mix Proportioning of High Performance Self-Compacting Concrete using Response Surface Methodology. Open Civil Engineering Journal, 3, (2009).

[13] 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(2), 694-702, (2009).

[14] Lim, C. H. Yoon, Y. S. and Kim, J. H.. Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete. Cement and Concrete Research,34(3), 409-420, (2004).

[15] Okere, C. E. Onwuka, D. O. and Onwuka, S. U. and Arimanwa, J. I. Simplex based concrete mix design. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 5(2), 46-55, (2013).

[16] Sonebi, M. Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts. Cement and concrete research, 31(11), 1553-1560, (2001).

[17] Aitcin, P. C. High-Performance Concrete E & FN SPON, Canada, (1998).

[18] Nehdi, M. Mindess, S. Aïtcin, P. C. Optimization of high strength limestone filler cement mortars. Cement and Concrete Research, 26(6), 883-893, (1996).

[19] Taguchi Quality EngineeringAt. the 54th Annual Quality Congress (May) in Indianapolis we gave a presentation on the integration of classical DOE with Taguchi, (2000).

[20] Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments (Vol. 7). New York: Wiley, (1997).

[21] Sahu, B.P Das, M.K. Optimization of felodipine nanosuspensions using Full Factorial Design. International Journal of PharmTech Research. (2013).

[22] Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, Å., Pettersen, J., Bergman, R. Experimental design and optimization. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 42(1), 3-40, (1998).

[۲۳] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن، (۱۳۸۵).