سومین کنفرانس بین‌المللی و هفتمین کنفرانس ملی
مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران
۱۷ - ۱۸ شهریورماه ۱۳۹۷، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

# تاثیر رده مقاومتی برخواص خمیر سیمان (غلظت نرمال و روانی)، طراحی و پیش بینی مقاومت فشاری ملات فروسیمان

**محمد عظیمی‌پور [۱]، حمید اسکندری نداف [۲]***

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری mohammadhsu@gmail.com
۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری Hamidiisc@yahoo.com

**چکیده:**

امروزه ملات فروسیمان کاربردهای فراوانی در سازه‌های بتنی داشته و استفاده از آن رو به افزایش می‌باشد. یکی از مهمترین مشخصه‌های فروسیمان، 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 پیش‌بینی مقاومت فشاری این نوع ملات می‌تواند تاثیرات مثبتی بر خواص و هزینه‌های آن داشته باشد. در این تحقیق ابتدا خصوصیات مصالح‌مصرفی در این نوع ملات از جمله توزیع دانه‌بندی مصالح سنگی و همچنین خصوصیات فیزیکی سیمان مصرفی مانند غلظت نرمال و روانی و همچنین تاثیر این خصوصیات بر انتخاب مناسب‌ترین سیمان مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه ضمن معرفی یک تابع هدف مناسب (scheffe) به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی مقاومت حاصل از طرح اختلاط این نوع ملات پرداخته شده است. ۳۶ طرح اختلاط با روش طرح مخلوط ملی ایران (آبا) برای سیمان‌های با رده ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ طراحی شد، سپس با کمک رابطه‌ی scheffe و حل یک معادله ماتریسی برای انواع سیمان‌ها، یک تابع هدف منحصر به فرد به دست‌آمد. به کمک این تابع می‌توان با داشتن وزن اجزای تشکیل دهنده ملات، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن را پیش‌بینی کرد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیمان رده ۵۲۵ نسبت به دیگر رده ها ضمن حفظ کارایی می‌تواند مقاومت بیشتری از خود نشان دهد و همچنین پیش‌بینی طراحی‌هایی که با خصوصیات فیزیکی سیمان(غلظت نرمال و روانی سیمان) سازگاری بیشتری دارد مناسب‌تر بوده و می توان با ضریب اطمینان بیشتری مقاومت این طراحی‌ها را پیش‌بینی کرد.

**کلمات کلیدی:** فروسیمان، غلظت نرمال، روانی سیمان، مدل‌سازی، پیش بینی

## ۱- مقدمه

برای اولین بار یک محقق ایتالیایی به نام لویجی نروی برای نام گذاری قسمتی از بتن مسلح باریک که حاوی یک لایه توری سیمی بود نام فروسیمان را به کار برد[۱]. امروزه با توجه به پیشرفت روز افزون صنعت بتن ، بتن و ملات فروسیمان مورد توجه محققین این امر قرار گرفته‌است[۲]. ملات فروسیمان از کارایی نسبتا بالایی برخوردار بوده[۳] و نیز دارای سرعت اجرای بالا می باشد که این امر باعث توجه بیشتر محققین به این موضوع شده‌است. فروسیمان با توجه به قابلیت‌های بالای خود نظیر درجات زبری مختلف، شکل پذیری، دوام، مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر ترک خوردگی، بیشتر از انواع دیگر بتن‌هایی که در ساخت و ساز به کار می‌روند، دارای کاربردهای متنوعی است[۴، ۵]. به طور معمول از ملات فرو سیمان علاوه بر تعمیرات، در صنعت قایق‌سازی ، منابع آب ، انبار غله، لوله‌ها ، سقف خانه‌ها و کارگاه‌ها استفاده می‌شود. از فروسیمان در ساخت خانه‌های ارزان قیمت نیز استفاده می شود[۶، ۷].

در عرصه‌ی بتن تحقیقات زیادی در مورد اعضا و ملات فروسیمان صورت گرفته از جمله این بررسی‌ها می‌توان به بررسی در مورد تاثیر ذرات نانو بر عملکرد ملات و المان‌های فروسیمان و کاربرد نانو ذرات سیلیس به عنوان یک سوپر پوزولان در ملات‌های مورد کاربرد در فروسیمان اشاره کرد،که 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 [۸]. و نیز می‌توان به تحقیقات طارق‌بن‌زیاد و همکارش در مورد خصوصیات مکانیکی فروسیمان اشاره کرد که نشان داد با افزایش لایه‌های سیمی می‌توان مقاومت خمشی فروسیمان را افزایش داد [۹].

در سال ۲۰۱۰توسط 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 نسبت‌های 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 فوق‌روان کننده 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[۱۰].در سال ۲۰۰۱ جوزف دگپوردر ضمینه بهینه‌سازی مخلوط ملات سیمان و مواد خام حاوی ذرات فلزی تحقیقاتی به عمل آورد. در این مطالعه در ملات سیمان، از مصالحی همچون آهک و سرباره ی فولادسازی 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 خوام را شامل می‌شود نوشته شد و مشخصات ملات را به کمک آن اصلاح کرد[۱۱].

درمورد تحقیقاتی که در ضمینه ی مدل‌سازی عددی فروسیمان صورت گرفته می توان به بررسی دکتر اکیل احمد اشاره کرد که صفحات فروسیمان را از جهات عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده است [۲]. همچنین گری .اف. مویتا در برزیل با کمک همکارانش یک مخزن فروسیمان را مدل‌سازی عددی کرده اند [۱۲]. کانون و مورتی در سال ۲۰۰۳نسبت اختلاط بهینه بتن را بدست آوردند[۱۳]. آنها با کمک مدل‌سازی طرح اختلاط با کمترین هزینه ارائه دادند.در بررسی آنها مقاومت و کارایی بتن توسط قید هایشان مدل‌سازی شد و برای سادگی کار از نرم‌افزار CMOP استفاده نمودند. حبیبی و یوسفی در سال ۲۰۰۹ بر اساس تعدادی طرح اختلاط یک نسبت اختلاط بهینه ارائه دادند. در ابتدا آنها با تعیین یک قید مقاومت مشخصه طرح را کنترل نمودند و سپس با استفاده از الگولیتم (SLP) روشی برای طرح اختلاط بهینه با مقاومت بالا و رسیدن به کمترین هزینه ارائه داند[۱۴]. مورلی و کندسمی در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش منحنی‌های هم‌پاسخ، طرح اختلاط بهینه بتن‌های خود متراکم با مقاومت بالا را مورد مطالعه قرار دادند[۱۵]. با استفاده از این روش، در این مطالعه آنها برنامه‌های تجربی را برای بهینه‌سازی چهار جزء اصلی بتن محتوی خاکستر بادی برای شش معیار کارایی ارائه دادند. مدل ارائه شده توسط آنها توانایی شناسایی طرح اختلاط بهینه بتن

و همچنین درصد بهینه مصرف هر یک از مواد مضاف را برای دستیابی به مقاومت مشخص شده، دارد . اوزبای و همکارانش در سال ۲۰۰۹ بهینه‌سازی چندهدفه را برای بتن‌های با مقاومت بالا با استفاده از روش تاگوچی انجام دادند[۱۶]. آنها در یک رتبه‌بندی میزان و اثر هر یک از نسبتها را بر روی بتن خودمتراکم با مقاومت بالا در حالت‌های تازه وسخت شده نشان دادند. یون و همکارانش در سال۲۰۰۳ از الگوریتم ژنتیک در نسبت اختلاط بتن با کارایی بالا استفاده نمودند[۱۷]. آنها با توجه به مزایای فراوان این نوع بتنها و در نظر گرفتن این نکته که رسیدن به کارایی مورد نظر در آنها نیاز به استفاده از مخلوطهای آزمایشی برای انتخاب ترکیب مورد نظر دارد، روش جدیدی برای طرح اختلاط بتن با کارایی بالا به منظور کاهش مخلوطهای آزمایشی پیشنهاد دادند .در تحقیق آنها بررسی‌های تجربی و تحلیلی برای بسط روش طراحی و بازبینی طرح اختلاط پیشنهادی انجام گرفت.

رمضانیانپور و حسن‌خانی در سال ۲۰۰۳ نسبت بهینه مواد در طرح اختلاط بتن غلتکی را تعیین نمود. آنها ابتدا تاثیر مواد تشکیل دهنده بتن غلتکی را بر مقاومت آن بررسی کردند و نسبت‌هایشان را مورد مطالعه قرار داند. سپس شرایط سنگندانه را در تعیین نسبت‌های بهینه جهت دستیابی به حداکثر مقاومت بررسی نمودند[۱۸].

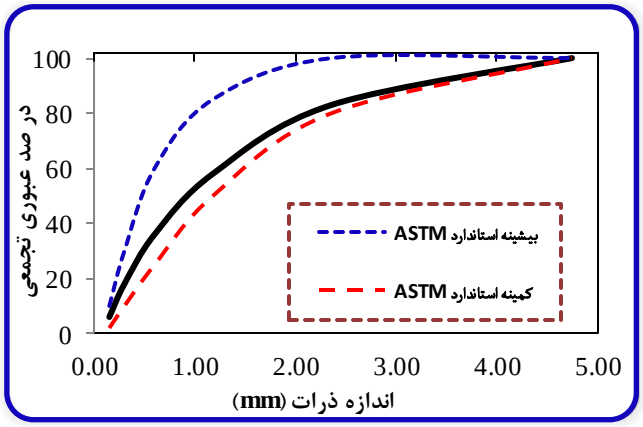
در سال ۱۳۹۰ طرح اختلاط بتن با دیدگاه جدیدی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از اصول بهینه‌سازی طرح اختلاط بهینه‌ای برای هزینه کمتر و مقاومت ۲۰ و ۲۵ مگاپاسکال تنظیم شد. در این بررسی محاسبات برای حجم واحد در نظر گرفته‌شده است. متغیرهای طراحی بر اساس نتایج آزمایشگاهی استخراج گردید و با بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی برنامه درجه دوم متوالی برای حل مسئله طرح اختلاط، نتایج اختلاط بهینه شده و در دوحالت تئوری و آزمایشگاهی محاسبه شد و نتایج نشان داد برای مقاومت ۲۰ مگاپاسکال نتایج تئوری و آزمایشگاهی یکسان بوده ولی برای مقاومت ۲۵ مگاپاسکال موفق به پیش بینی رفتار بتن نشدند. بنابراین نتایج نشان داد رفتار بتن به صورت خطی نمی‌باشد[۱۹].

همانطور که در بالا اشاره شد تا به امروز مطالعات زیادی در مورد ملات فروسیمان و تاثیر انواع افزودنی ها بر خواص مکانیکی آن انجام شده است و همچنین چندین مدل‌سازی در مورد اعضای فروسیمانی صورت گرفته است[۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳]. اما تا به امروز مطالعه و بررسی بر روی نسبت‌های اختلاط ملات فروسیمان و همچنین مقاومت فشاری آن صورت نگرفته است. در این پژوهش ابتدا آزمایشات غلظت نرمال و(Flow table) بر روی سیمان مورد کاربرد در ساخت ملات فروسیمان صورت پذیرفت سپس با معرفی تابع هدف ( scheffe ) به منظور مدل‌سازی طرح اختلاط ملات فروسیمان، ۳۶ طرح اختلاط مختلف با روش طرح مخلوط ملی ایران (آبا) به تفکیک رده مقاومتی سیمان، تنظیم شد که هر کدام را مدل‌سازی کرده، تابع هدف مربوط به هر گروه را بدست آورده و با کمک تابع هدف حاصله و وزن اجزا تشکیل دهنده ی ملات، صحت تابع هدف را بررسی کردیم. نتایج نشان داد هرچه نسبت آب به سیمان اختلاط به نتایج حاصل از غلظت نرمال و روانی آن نوع سیمان نزدیک‌تر باشد تابع هدف خروجی مطلوب تر و نزدیک به حقیقت را می‌دهد.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی:

### ۲-۱. مصالح مصرفی:

سیمان استفاده شده، سیمان پرتلند تیپ ۱ با رده های مختلف ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ می باشد. بزرگترین بعد دانه ی ماسه ی مصرفی ۴,۷۵ میلی متر می باشد و دانه بندی مصالح سنگی مطابق با نمودار ۱ می باشد که در محدوده ی استاندارد قرار دارد. آب استفاده شده در این بررسی از آب لوله کشی شرکت آب و فاضلاب سبزوار می باشد.

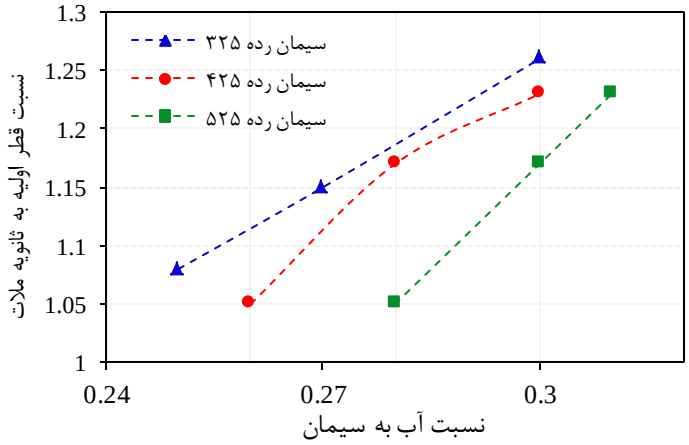



**نمودار ۱:** نمودار دانه بندی ماسه مصرفی و استاندارد

از آنجا که در ملات مورد استفاده در اعضای فروسیمان، روانی نقش بسیار مهمی دارد، معمولا از ۱ الی ۲ درصد وزن سیمان فوق روان کننده استفاده می کنند تا به روانی مطلوب دست یابند. در این پژوهش نیز در آزمایشات روانی و غلظت نرمال در هر سه رده مقاومتی سیمان به میزان ثابت برابر ۱/۵ درصد فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیل استفاده شده است.

### ۲-۳. آزمایش روانی ملات سیمان:

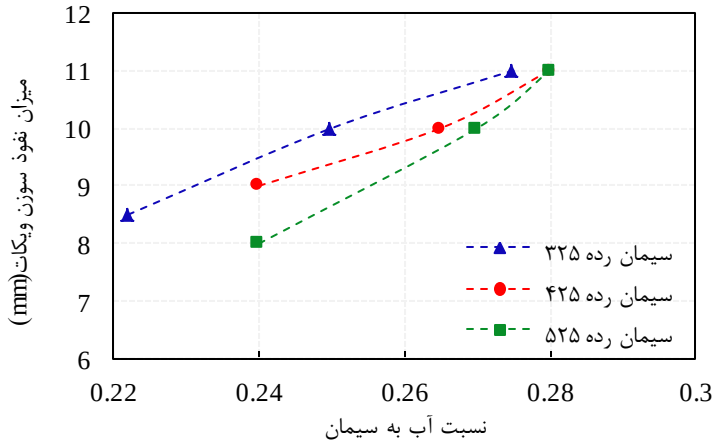
هدف از انجام این آزمایش دست یافتن به میزان آب، برای رسیدن به روانی مناسب ملات سیمان می‌باشد. برای هر نمونه مطابق ASTM-C230 عمل می‌کنیم. در این آزمایش مانند آزمایش غلظت نرمال بایستی حداقل سه بار آزمایش تکرار شود به این صورت که یک دقیقه پس از آماده شدن ملات ، قالب را برداشته و فوراً میز سیلان را به وسیله ی چرخاندن دسته ی آن، از ارتفاع ۱۳ میلی متری رها می کنیم . این عمل ۲۵ بار در مدت ۱۵ ثانیه تکرار می شود . مقدار سیلان برابر افزایش قطر قاعده ملات می‌باشد و به صورت درصدی از قطر اولیه بیان می‌گردد . برای هر نمونه ، سه ملات آزمایشی با درصدهای مختلف آب ساخته و آزمایش سیلان را برای آنها انجام می‌دهیم. با رسم نمودار و درونیابی، مقدار آبی را که به ازای آن، سیلان ملات $110 \pm 5(mm)$ باشد، می‌یابیم. نتایج این آزمایش در نمودار۳ آمده است.




**نمودار۳:** نتایج آزمایش روانی

### ۲-۲. آزمایش غلظت نرمال:

برای تعیین غلظت نرمال ملات سیمان حداقل بایستی ۳ بار این آزمایش را به این صورت تکرار کرده که بلافاصله پس از آماده شدن ملات حداکثر تا ۳۰ ثانیه آن را در قالب دستگاه ویکات قرارداده و نفوذ سوزن را درون ملات پس از ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری کنیم. نسبت آب به سیمانی که سوزن به اندازه $10 \pm 1(mm)$ در ملات نفوذ کند را غلظت‌نرمال سیمان می گویند. برای بدست‌آوردن این مقدار برای هر نوع سیمان آزمایش را با نسبت‌های مختلف آب به سیمان تکرار کرده و با درونیابی از داده‌ها، غلظت نرمال سیمان مورد نظر بدست می‌آید که نتایج بصورت نمودار ۲ می‌باشد.




**نمودار ۲:** نتایج آزمایش غلظت نرمال سیمان با رده های مختلف

## ۳. بررسی نتایج آزمایشات:

با مقایسه نتایج آزمایش غلظت نرمال و روانی استنتاج می‌شود که استفاده از سیمان با رده بالاتر در تولید ملات، مناسب‌تر از رده های پایین‌تر می‌باشد. با توجه به داده‌های جدول ۲ غلظت‌نرمال سیمان رده ۵۲۵ حدود ۰,۲۷ می‌باشد و از غلظت‌نرمال سیمان های رده ۳۲۵ و ۴۲۵ بیشتر شده است. این اختلاف در غلظت نرمال بیانگر این مفهوم می‌باشد که با افزایش رده سیمان، می‌توان برای تولید ملات از میزان آب بیشتر استفاده کرد و همچنین مقاومت بیشتری بدست آورد. از طرفی با توجه به جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش روانی ملات نشان می‌دهد با افزایش رده سیمان میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به روانی یکسان، بیشتر می‌باشد. این موضوع با توجه به این نکته که دانه‌های سیمان رده ی ۵۲۵از سیمان‌های ۳۲۵ و ۴۲۵ ریزتر بوده و طبیعی است که برای رسیدن به روانی یکسان به آب بیشتری نیاز داشته باشد، اما مزیت استفاده از سیمان ۵۲۵ این است که که افزایش وزن آب مصرفی مقاومتش را نسبت به سیمان‌های ۴۲۵ و ۳۲۵ کمتر نمی کند و با نسبت آب به سیمان بیشتر، مقاومت بیشتر را نیز می‌دهد. بنابراین استفاده است سیمان رده ۵۲۵ نسبت به سیمان‌های ۴۲۵ و ۳۲۵ مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

## ۴. مدل سازی طرح ختلاط:

**رابطه** scheffe :

به منظور مدل‌سازی طرح اختلاط بتن، همه خواص مطلوب برای هر طرح اختلاط اندازه‌گیری شده و به عنوان تابعی از اجزاء تعریف می‌گردد .نوعا توابع چند جمله‌ای برای مدل کردن استفاده می‌شوند ولی سایر اشکال توابع نیز می‌توانند استفاده شوند.

برای n جزء، تابع چند جمله ای خطی عبارتست از:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n \quad (۱)$$

که در آن $y$ تابع هدف، $x_i$ محدودیت ها و $b_i$ ثابت های تابع می باشند.

می‌توان رابطه فوق را به صورت چند جمله ای درجه دو زیر نیز نوشت که چند جمله ای scheffe نامیده می‌شود:

$$y = \sum_{k=0}^{n} b_0 + \sum_{i=0}^{n} b_i x_i + \sum_{i=0}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=0}^{n} b_{ijk} + x_i x_j x_k + \sum_{i=0}^{n} bi_1 i_2 \dots i_n x i_1 x\, i_2 \dots x i_n \quad (۲)$$

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

در این بررسی به منظور مدل‌سازی طرح اختلاط ملات فروسیمان، برای سیمان با رده‌های ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵، ۱۲ طرح اختلاط با مقاومت‌های مختلف نوشته شد. اگر فرض کنیم سه پارامتر متغیر داشته باشیم (وزن آب، سیمان و ماسه) تابع هدف آن را به صورت زیر می‌توان نوشت، که دارای ۳ متتغیر و ۹ ضریب می باشد:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}{x_1}^2 + b_{22}{x_2}^2 + b_{33}{x_3}^2 \quad (۳)$$

که $y$ بیانگر مقاومت، $x_1$ وزن آب ، $x_2$ وزن سیمان و $x_3$ وزن ماسه می‌باشد.

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 پیش‌بینی کرد.

محدودیت‌های متغیرهای تابع هدف که با توجه به آیین نامه آبا در نظر گرفته شده است به صورت زیر می‌باشد:

وزن آب: $۲۳۰ < x_1 < ۳۵۰$

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.

## ۵. طرح اختلاط

### ۵-۱. طرح اختلاط بتن فروسیمان با روش طرح مخلوط ملی ایران( آبا):

با توجه به اینکه آیین نامه آبا بر اساس خصوصیات شن و درصد شکستگی سنگدانه‌ها طرح اختلاط را مشخص می‌کند؛ استفاده از این آیین‌نامه برای ملات فروسیمان مناسب نیست اما با بعضی فرضیات و تغییرات در این روش، می‌توان از این آیین‌نامه برای محاسبه طرح اختلاط ملات استفاده کرد. این طرح اختلاط را برای سه نوع سیمان با رده‌های مختلف ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ و در مقاومت‌های مختلف و با فرض صد درصد شکسته بودن سنگدانه‌ها صورت گرفت. بزرگترین بعد دانه‌ها ۴,۷۵ میلی متر و مدول نرمی کلیه‌ی طرح اختلاط‌ها را برابر با کمترین حالت ممکن یعنی برابر با ۳ و مقدار شن موجود در ملات برابر صفر فرض شده است. وزن مخصوص سیمان برابر ۳,۱۰، وزن مخصوص ماسه برابر۲,۵و وزن مخصوص آب برابر ۱ در نظر گرفته شده است. اوزان

ارائه شده برای حجم یک متر مکعب می‌باشند و درصد فوق روان کننده نسبت به سیمان در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط‌ها، توابع هدف و پیش بینی مقاومت فشاری ملات با کمک تابع هدف بدست آمده، به شرح زیر می‌باشد:

**جدول ۲**- مشخصات طرح اختلاط سیمان رده ۳۲۵

| ردیف | مقاومت طرح(MPa) | فوق روان کننده(٪) | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰ | ۰ | ۰,۵۴ | ۲۸۰ | ۵۲۰ | ۱۱۴۶ |
| ۲ | ۳۰ | ۰ | ۰,۴۳ | ۳۴۹ | ۸۱۸ | ۹۲۰ |
| ۳ | ۲۰ | ۰,۵ | ۰,۵۶ | ۲۶۰ | ۴۶۷ | ۱۳۷۳ |
| ۴ | ۳۰ | ۰,۵ | ۰,۴۴ | ۲۸۲ | ۶۴۲ | ۱۱۷۷ |
| ۵ | ۴۰ | ۰,۵ | ۰,۳۶ | ۳۰۷ | ۸۶۴ | ۹۳۵ |
| ۶ | ۲۰ | ۱ | ۰,۵۶ | ۲۳۸ | ۴۲۷ | ۱۴۶۱ |
| ۷ | ۳۰ | ۱ | ۰,۴۴ | ۲۵۸ | ۵۸۷ | ۱۲۸۱ |
| ۸ | ۴۰ | ۱ | ۰,۳۶ | ۲۸۱ | ۷۹۰ | ۱۰۶۰ |
| ۹ | ۴۰ | ۱,۵ | ۰,۳۹ | ۲۹۰ | ۷۵۰ | ۱۲۰۰ |

$$y_{325} = -0.7807x_1 + 0.7069x_2 - 0.2579x_3 - 0.0005x_1x_2 + 0.0005x_1x_3 - 0.0001x_2x_3 + 0.0009{x_1}^2 - 0.0002{x_2}^2 + 0.0001{x_3}^2 \quad (۴)$$

**جدول ۳**- مشخصات طرح اختلاط سیمان رده ۳۲۵ و پیش‌بینی مقاومت آن

| ردیف | مقاومت(MPa) | مقاومت پیش بینی شده(MPa) | فوق روان کننده(٪) | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰ | ۲۷ | ۰ | ۰,۶۱ | ۳۱۰ | ۵۰۸ | ۱۳۲۰ |
| ۲ | ۳۰ | ۳۵ | ۰,۵ | ۰,۵۵ | ۳۳۸ | ۶۱۵ | ۱۲۴۸ |
| ۳ | ۴۰ | ۳۹ | ۰,۵ | ۰,۳۶ | ۲۶۸ | ۷۵۴ | ۱۱۲۵ |

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود، سیمان رده ی۳۲۵ را نمی توان برای مقاومت های بالاتر از ۴۰ مگاپاسکال طراحی کرد و نیز طراحی برای مقاومت ۴۰ مگاپاسکال مشروط بر استفاده از فوق روان کننده می باشد. طبق آیین نامه آبا در این طراحی به ازای استفاده ی ۰,۵ و۱ درصد از فوق روان کننده به ترتیب ۱۸ و ۲۵ درصد از وزن آب مصرفی کاسته شده است. در جدول ۳ پیش بینی مقامت های طراحی بر اساس رابطه ی مدل سازی شده برای سیمان ۵۲۵ مشاهده می شود. یکی از نکات قابل توجه در این جدول این است که با افزایش مقاومت طرح دقت پیش بینی افزایش می یابد در ردیف اول مدل ارائه شده دارای ۳۵ درصد خطا می باشد.

**جدول ۴**- مشخصات طرح اختلاط سیمان رده ۴۲۵

| ردیف | مقاومت طرح(MPa) | فوق روان کننده(٪) | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰ | ۰ | ۰,۶۱ | ۳۰۹ | ۵۰۸ | ۱۲۱۹ |
| ۲ | ۳۰ | ۰ | ۰,۵ | ۳۳۰ | ۶۶۵ | ۱۰۴۰ |
| ۳ | ۴۰ | ۰ | ۰,۳۹ | ۳۶۰ | ۹۱۹ | ۷۵۸ |
| ۴ | ۲۰ | ۰,۵ | ۰,۶۱ | ۲۵۳ | ۴۱۴ | ۱۴۳۴ |
| ۵ | ۳۰ | ۰,۵ | ۰,۵ | ۲۷۰ | ۵۴۴ | ۱۵۹۸ |
| ۶ | ۴۰ | ۰,۵ | ۰,۴۲ | ۲۸۸ | ۶۹۱ | ۱۱۲۲ |
| ۷ | ۵۰ | ۰,۵ | ۰,۳۵ | ۳۱۰ | ۸۸۸ | ۹۰۸ |
| ۸ | ۲۰ | ۱ | ۰,۶۱ | ۲۳۱ | ۳۷۹ | ۱۵۱۶ |
| ۹ | ۳۰ | ۱ | ۰,۵ | ۲۴۷ | ۴۹۷ | ۱۳۸۱ |

$$y_{425} = -3.4009x_1 - 1.6796x_2 + 1.1834x_3 + 0.0023x_1x_2 + 0.000037x_1x_3 + 0.0004x_2x_3 + 0.0045{x_1}^2 + 0.0007{x_2}^2 - 0.0005{x_3}^2 \quad (۵)$$

**جدول ۵**- مشخصات طرح اختلاط سیمان رده ۴۲۵ و پیش بینی مقاومت آن

| ردیف | مقاومت(MP) | مقاومت پیش بینی شده(MP) | فوق روان کننده(٪) | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰ | ۲۷ | ۱ | ۰,۵۹ | ۳۱۷ | ۵۴۱ | ۱۱۸۴ |
| ۲ | ۴۰ | ۴۴ | ۱ | ۰,۴۴ | ۲۹۸ | ۶۸۵ | ۱۱۲۴ |
| ۳ | ۵۰ | ۵۲ | ۱ | ۰,۳۲ | ۲۷۴ | ۸۵۴ | ۱۰۱۴ |

همانطور که برای سیمان رده ۳۲۵ بدون استفاده از فوق روان کننده نمی توان مقاومت ۴۰ مگاپاسکال را طراحی کرد برای سیمان رده ۴۲۵ نیز نمی توان مقاومت ۵۰ مگاپاسکال را بدون در نظر گرفتن فوق روان کننده طراحی کرد. در طرح اختلاط هایی که برای بررسی صحت مدل بدست آمده در سیمان رده ۴۲۵ انتخاب شده به میزان یکسان از فوق روان کننده استفاده شده است اما میزان خطای این مدل برای مقاومت ۲۰ مگاپاسکال با مدل قبلی تقریبا یکسان بوده (در حد اعشار متفاوت می باشد.) این درحالی است که در هردو طرح اختلاط نسبت آب به سیمان حدود ۰,۶ می باشد.نزدیکی نسبت آب به سیمان این دو طرح اختلاط که با سیمان های مختلف طراحی شده اند، به دلیل نمودار مقاومت بر حسب نسبت آب به سیمان در آیین نامه آبا می باشد با توجه به اینکه در طرح اختلاط شماره ۱ جدول ۵ از فوق روان کننده استفاده شده ولی در طرح اختلاط ۱ جدول ۳ از فوق روان کننده استفاده نشده است اما به دلیل افزایش رده سیمان نسبت آب به سیمان هردو طرح اختلاط تقریب مساوی بوده؛ بنابراین طبیعی است که میزان خطای هر هر دو مدل یکسان باشد. اما در طرح اختلاط ۲و ۳ جدول ۵ به دلیل افزایش رده سیمان نسبت به جدول ۳ و در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان، میزان خطا مقدار زیادی کاهش یافته و به حدود ۴ درصد رسیده است.

**جدول ۶**- مشخصات طرح اختلاط سیمان رده ۵۲۵

| ردیف | مقاومت طرح(MPa) | فوق روان کننده(٪) | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰ | ۰ | ۰,۶۶ | ۳۰۱ | ۴۵۸ | ۱۲۷۷ |
| ۲ | ۳۰ | ۰ | ۰,۵۶ | ۳۱۷ | ۵۶۵ | ۱۱۵۳ |
| ۳ | ۴۰ | ۰ | ۰,۴۷ | ۳۳۵ | ۷۰۹ | ۹۹۰ |
| ۴ | ۵۰ | ۰ | ۰,۳۵ | ۳۷۸ | ۸۹۷ | ۵۸۱ |
| ۵ | ۲۰ | ۰,۵ | ۰,۶۶ | ۲۴۷ | ۳۷۵ | ۱۴۸۰ |
| ۶ | ۳۰ | ۰,۵ | ۰,۵۶ | ۲۶۰ | ۴۶۵ | ۱۳۷۶ |
| ۷ | ۴۰ | ۰,۵ | ۰,۴۸ | ۲۷۴ | ۵۷۵ | ۱۲۵۱ |
| ۸ | ۵۰ | ۰,۵ | ۰,۴ | ۲۹۲ | ۷۲۵ | ۱۰۸۵ |
| ۹ | ۲۰ | ۱ | ۰,۶۶ | ۲۲۶ | ۳۴۳ | ۱۵۵۸ |

$$y_{525} = 1.8113 + 0.8198x_2 - 2.31x_3 - 0.0011x_1x_2 + 0.0017x_1x_3 + 0.0005x_2x_3 - 0.0025{x_1}^2 - 0.0003{x_2}^2 + 0.001{x_3}^2 \quad (۶)$$

**جدول ۷**- مشخصات طرح اختلاط سیمان رده ۵۲۵ و پیش بینی مقاومت آن

| ردیف | مقاومت(MP) | مقاومت پیش‌بینی شده(MP) | فوق روان کننده(٪) | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳۰ | ۲۸ | ۱ | ۰,۵۶ | ۲۳۸ | ۴۲۵ | ۱۴۶۳ |
| ۲ | ۴۰ | ۳۸ | ۱ | ۰,۴۸ | ۲۵۱ | ۵۲۶ | ۱۳۴۹ |
| ۳ | ۵۰ | ۴۹ | ۱ | ۰,۴ | ۲۶۷ | ۶۶۳ | ۱۱۹۷ |

با افزایش رده سیمان درصد خطای مدل پیش بینی کاهش یافته است، برای مثال پیش بینی مقاومت ۵۰ مگاپاسکال با سیمان رده ۴۲۵ دارای ۴ درصد خطا می باشد ولی همین مقاومت برای سیمان ۵۲۵ با ۲ درصد خطا همراه می باشد این درحالی است که به دلیل افزایش مقاومت سیمان نسبت های آب به سیمان در سیمان رده ۵۲۵ از نسبت های آب به سیمان در دیگر رده ها بیشتر می باشد. اما به طور کلی، با افزایش مقاومت سیمان مصرفی و کاهش نسبت آب به سیمان دقت مدل های پیش بینی افزایش یافته است.

در برخی از طرح اختلاط‌های ارائه شده، وزن سنگدانه و سیمان برای ساخت ملات مناسب نمی‌باشد. برای مثال طرح اختلاط شماره ۲ در جدول ۲ که تقریبا وزن ماسه و سیمان برابر می‌باشد و نسبت آن‌ها برابر ۱ شده است؛ در حالی که طبق استانداردهای موجود وزن ماسه به سیمان برای ملات‌های سیمانی بایستی حدود ۲,۷۵ باشد. از آنجایی که این بررسی تئوری می‌باشد، نتایج حاصل از آیین نامه‌های آبا بدون تغییر ارائه شده است.

## ۵. نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش ابتدا خصوصیات فیزیکی سیمان از جمله غلظت نرمال و روانی آن مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد استفاده از سیمان رده ۵۲۵ از نظر مقاومت و روانی مناسب‌تر از سیمان‌های ۳۲۵ و ۴۲۵ می‌باشد. همچنین در مورد مدل‌سازی طرح اختلاط و رابطه‌ی scheffe می‌توان نتیجه گرفت انتخاب صحیح متغیرهای تصمیم و تابع هدف، کمک زیادی در حل مسائل فروسیمان خواهد داشت. در این بررسی به منظور اثبات صحت توابع هدف ارائه شده، ثابت‌های تابع هدف $(b_i)$ برای سیمان‌های مختلف و مقاومت فشاری متفاوت محاسبه شد و پاسخ آنها با سه طرح اختلاط با مقاومت‌های مختلف بررسی شد. نتایج حاکی از آن دارد که پیش‌بینی طرح اختلاط ملات با رابطه‌ی scheffe برای روش آبا مناسب می‌باشد و با درصد خطای کمی را همراه می‌باشد. در ادامه نتایج نشان داد استفاده از سیمان رده ۵۲۵ برای تولید ملات فروسیمان نه تنها از لحاظ مقاومت و روانی مناسب می‌باشد بلکه پیش‌بینی مقاومت فشاری آن نیز با خطای کمتری همراه است.، همچنین به طور کلی هرچه نسبت آب به سیمان طرح اختلاط کاهش یابد و به نتایج حاصل از آزمایشات غلظت نرمال و روانی نزدیک‌تر باشد پیش بینی مقاومت فشاری با خطای کمتری همراه می‌باشد.

### مراجع

[1]. Sasiekalaa, K., and R. Malathy. "A Review Report On Mechanical Properties Of Ferrocement With Cementitious Materials." International Journal of Engineering1, no. 9 (2012).
[2]. Ahmed, Akil. "A Numerical Study on Mode Shapes of Point Supported Ferrocement Plates." variations 9, no. 1: 1.
[3].K.sasiekalla, R.Malathy " A Reveiw Report on Mechanical Propertis of Ferrocement whit Cementious Materials" International journal of Engineering Research technology. vol.1 Issue, 2012
[4]. Naaman AE. "Ferrocement and laminated cementitious composites. Ann Arbor," Michigan: Techno Press 3000, p. 372; 2000.
[5]. Memon NA, Salihuddin RS. "Ferrocement: a versatile composite structural material," Mehran University Research Journal of Engineering and Technology;25(1):9 18, 2006.
[6]. 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.
[7]. Arif M, Kaushik SK, Pankaj. "Experimental and analytical studies on flexural behaviour of ferrocement plates," Proceedings of sixth international symposium on ferrocement, ERROMichigan, USA: University of Michigan;.p. 23349, 1998.
[۸]. خالو، ع. حسینی، پ. بوشهریان، ع. توسعهٔ ساخت المان های کم ضخامت سازها ی با بهرهگیری از نانو ذرات $SiO_2$. مجله تحقیقات بتن، سال سوم، شماره ۲، زمستان، (۱۳۸۹).
[۹]. ابوذر صدر کریمی، کسگین خواهشی بناب. انتخاب شکل، جنس و دانه بندی بهینه مصالح سنگی برای بتن توانمند. اولین کنگره ملی مهندسی عمران. ۱۳۸۳.
[۱۰]. Ban, Cheah C., and Mahyuddin Ramli."Optimization of mix proportion of high performance mortar for structural applications." American Journal of Engineering and Applied Sciences 3, no. 4 (2010): 643.
[11]. Odigure, Joseph O. "Optimization of cement mortar strength from raw mix containing metallic particles." Cement and concrete research 31, no. 1 (2001): 51-56.
[12]. Moita, Gray F., Estevam B. de Las Casas, Edgar V. Mantilla Carrasco, and Sávio N. Bonifácio. "Experimental and numerical analysis of large ferrocement water tanks." Cement and Concrete Composites 25, no. 2 (2003): 243-251.

[13]. Cannon, John P., and G. R. Krishna Murti. "Concrete optimized mix proportioning (COMP)." Cement and Concrete Research 1, no. 4 (1971): 353-366.

[۱۴]. حبیبی،علیرضا .یوسفی،مهدی" .بهینه کردن اجزاءاصلی بتن با استفاده ازاصول بهین هسازی "اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت .زیرساخت ها1388 .

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

[16]. Ozbay, Erdoğan, AhmetOztas, AdilBaykasoglu, and HakanOzbebek. "Investigating mix proportions of high strength self-compacting concrete by using Taguchi method." Construction and building materials 23, no. 2 (2009): 694-702.

[17]. Lim, Chul-Hyun, Young-Soo Yoon, and Joong-Hoon Kim."Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete." Cement and Concrete Research 34, no. 3 (2004): 409-420.

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

[۱۹]. علی رضا حبیبی، هومن صفاری. (طرح اختلاط بتن با استفاده از اصول بهینه سازی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی)، مجله تحقیقات بتن شماره دوم. ص۱۷، .۱۳۹۰

[20]. Shannag, M. Jamal. "Bending behavior of ferrocement plates in sodium and magnesium sulfates solutions." Cement and Concrete Composites 30, no. 7 (2008): 597-602.

[21]. Aboul-Anen, Boshra, Ahmed El-Shafey, and Mostafa El-Shami."Experimental and analytical model of ferrocement slabs." International Journal of Recent Trends in Engineering 1, no. 6 (2009): 25-29.

[22]. Arif, Mohammed, and Surendra K. Kaushik. "Mechanical behaviour of ferrocement composites: an experimental investigation." Cement and Concrete Composites 21, no. 4 (1999): 301-312.