

طراحی و پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات فروسیمان

محمد عظیمی پور^۱ و حمید اسکندری^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

^۱Mohammadhsu@gmail.com

^{۲*}Hamidiisc@yahoo.com

^۱09105102012

کد موضوع مقاله: C

کد انجمن: 3C

چکیده:

امروزه ملات فروسیمان کاربردهای فراوانی در سازه‌های بتنی داشته و استفاده از آن در اعضای ساختمانی و عمرانی پیش‌ساخته 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 تأثیرات مثبتی بر خواص و هزینه‌های آن داشته باشد.

هدف از انجام این تحقیق پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات فروسیمان با توجه به میزان مصالح مصرفی در ساخت آن می‌باشد. در این تحقیقات به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات فروسیمان یک رابطه که حاوی وزن سیمان، آب، ریزدانه، نانوسیلیس، میکروسیلیس و همچنین عدد اسلامپ می‌باشد، ارائه شده است. صحت این رابطه با استفاده از داده‌ها و تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین به روش طرح مخلوط ملی، طرح اختلاط ملات فروسیمان برای مقاومت‌های مختلف طراحی شده و صحت این طرح اختلاط‌ها با توجه به رابطه ارائه شده نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. در انتها رابطه ارائه شده با دیگر روش‌های آماری کاربردی در پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات سیمانی مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی با استفاده از رابطه‌ی ارائه‌شده در این تحقیقات ضمن کاربردی بودن برای طراحی اختلاط انواع ملات سیمانی نسبت به دیگر روش‌های آماری با انحراف معیار مطلوب‌تر و خطای کمتر همراه می‌باشد.

واژگان کلیدی: ملات، فروسیمان، طرح اختلاط، پیش‌بینی، مقاومت فشاری.

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 محققان این امر قرار گرفته است [۲]. ملات فروسیمان از کارایی نسبتاً بالایی برخوردار بوده [۳] و نیز دارای سرعت اجرای بالا می‌باشد که این امر باعث توجه بیشتر پژوهشگران به این موضوع شده است. 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 فروسیمان 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 می‌شود [۶، ۷].

در عرصه‌ی تکنولوژی بتن تحقیقات زیادی در مورد اعضا و ملات فروسیمان صورت گرفته است، از جمله این بررسی‌ها می‌توان به بررسی در مورد تاثیر ذرات نانو بر عملکرد ملات فروسیمان و المان‌های ساخته شده با این ملات 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 پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان داد استفاده از ذرات نانو تا حدودی روند کسب مقاومت را افزایش می‌دهد [۸].

در زمینه پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و ملات‌های سیمانی تحقیقات متعددی صورت گرفته است. در سال ۲۰۱۲ طی تحقیقاتی محققان اوکراینی موفق به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن خود متراکم با مقاومت بالا شدند [۹]. آنها ابتدا با مشخص کردن ضریب تاثیر هر یک از پارامترهای موثر در مقاومت فشاری بتن و سپس بوسیله رابطه‌ی *Scheffe* و مشخص کردن محدودیت‌های منطقی برای پارامترهای طرح اختلاط و همچنین ساخت و آزمایش نمونه‌ها موفق به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن خود متراکم با مقاومت بالا شدند.

در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی مدل‌سازی طرح اختلاط 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 (۱:۲.۷۵، ۱:۲.۵) 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]. محققین در زمینه 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 سرباره‌ی 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].

همانطور که در بالا اشاره شد تا به امروز مطالعات زیادی در مورد ملات فروسیمان و تاثیر انواع افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی آن انجام شده است و همچنین چندین مدل‌سازی در مورد اعضای فروسیمانی صورت گرفته است [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. علاوه بر این، تحقیقات متعددی بر روی پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و ملات سیمانی صورت گرفته است. اما تا به امروز مطالعه و بررسی بر روی نسبت‌های اختلاط ملات فروسیمان و همچنین پیش‌بینی مقاومت فشاری آن صورت نگرفته است.

در این بررسی ضمن بررسی چند روش برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و ملات فروسیمان و ارائه‌ی یک رابطه مناسب که بر اساس طرح اختلاط ملات سیمان و فروسیمان تنظیم شده است، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات سیمان و فروسیمان پیش‌بینی می‌شود. برای نشان دادن صحت و دقت این پیش‌بینی از داده‌های محققان پیشین [۱۰، ۱۶] و نتایج طرح اختلاط آنها استفاده شده است. سپس با استفاده از روش طرح مخلوط بتن ایران (آبا) طرح اختلاط ملات فروسیمان برای مقاومت‌های مختلف طراحی شده است و نیز مقاومت‌های طراحی شده با رابطه‌ی ارائه شده کنترل می‌شود. در انتها رابطه‌ی ارائه شده با رابطه‌ی *Scheffe* به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات سیمان و فروسیمان مقایسه گردیده است.

۲- پیش‌بینی مقاومت فشاری

به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و ملات فروسیمان تا به امروز روش‌های مختلفی مطرح شده است که به بررسی برخی از آنها می‌پردازیم.

۲-۱- پیش‌بینی با تست‌های غیرمخرب

یکی از روش‌هایی که در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و ملات‌های سیمانی کاربرد دارد تست‌های غیرمخرب از جمله التراسونیک و یا استفاده از چکش اشمیت می‌باشد. در سال ۱۳۸۸ محققان ایران با کمک تست غیرمخرب التراسونیک مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را ارزیابی کردند [۱۷]. آنها ابتدا با کمک تست التراسونیک مقاومت ۲۸ روزه ی نمونه‌های مکعبی که با ابعاد ۱۰ سانتی‌متری در ۱۸ طرح اختلاط ساخته شده بود پیش‌بینی کرده و نتایج پیش‌بینی شده را با کمک سیستم شبکه عصبی و ژنتیک الگوریتم مدل‌سازی و بهینه کردند. میانگین خطای حاصله کمتر از ۵ درصد گزارش شده است.

۲-۲- پیش‌بینی با استفاده از نسبت اعداد طرح اختلاط

در سال‌های اخیر برخی محققین روابطی که شامل نسبت وزنی اجزای تشکیل دهنده بتن و یا ملات سیمانی است ارائه داده‌اند که با قرار دادن این مقادیر می‌توان مقاومت فشاری ۲۸ روزه را پیش‌بینی کرد. محققان کره ای با ارائه‌ی یک رابطه، موفق به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی شدند [۱۸]. آنها ابتدا با کمک معادله انرژی و انجام آزمایشات متعدد رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بدست آوردند سپس با کمک خصوصیات مصالح از جمله تاثیر نسبت آب به سیمان و یا درصد استفاده از خاکستر بادی به جای سیمان، توانستند رابطه‌ای ارائه دهند که بتواند مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی را با خطای کم پیش‌بینی کند. رابطه‌ی پیشنهادی آنها به صورت زیر می باشد:

$$S_{28} = 16.8 \left(\frac{c}{w} - 2.014 \times \frac{f}{w} \right) + 9.2 \quad (1)$$

که در آن S_{28} مقاومت فشاری ۲۸ روزه به مگاپاسکال، c وزن سیمان، w وزن آب و f وزن خاکستر بادی می‌باشد

۲-۳- پیش‌بینی با روش‌های آماری

استفاده از روش‌ها و آنالیزهای آماری در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران تکنولوژی بتن قرار گرفته است. برخی از روش‌های آماری در تخمین پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و ملات سیمان کاربرد دارد. پژوهشگران از تابع Scheffe برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن استفاده کرده‌اند. در این مورد می‌توان به محققان نیجریه اشاره کرد که در سال ۲۰۱۳ با کمک رابطه‌ی Scheffe و آنالیز سیمپلکس مقاومت فشاری بتن را با توجه به طرح اختلاط و نسبت‌های وزنی آن با تقریب خوبی پیش‌بینی کنند [۱۹].

به منظور مدل‌سازی طرح اختلاط بتن، تمام 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 جمله‌ای خطی عبارتست از:

$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (2)$$

که در این معادله b_i ها ضرایب ثابت می‌باشند.

می‌توان رابطه فوق را به صورت چند جمله‌ای درجه دو زیر نیز نوشت که چند جمله‌ای Scheffe نامیده می‌شود:

$$y = \sum_{i=0}^n b_0 + \sum_{i=0}^n b_i x_i + \sum_{i=0}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=0}^n b_{ijk} + x_i x_j x_k + \sum_{i=0}^n b_{i_1 i_2 \dots i_n} x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_n} \quad (3)$$

که در آن y هدف، b_{ij} و b_{ijk} ضرایب محدودیت‌ها و x_j و x_i متغیرها و محدودیت‌ها می‌باشند.

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 متغیر و ۹ ضریب می‌باشد:

$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (4)$$

که در تابع هدف 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. پس از مشخص شدن ضرایب ثابت می‌توان با قرار دادن وزن آب، ماسه و سیمان در متغیرها مقاومت فشاری ملات را پیش‌بینی کرد.

۲-۴- رابطه‌ی پیشنهادی

آنچه در بالا آمد روش‌هایی بود که در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و یا ملات سیمانی تا به امروز استفاده شده‌اند. تا کنون روش و یا رابطه‌ای جامع برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات فروسیمان ارائه نشده است. با توجه به این که رابطه‌ی اجزای تشکیل دهنده‌ی ملات فروسیمان با مقاومت آن رابطه‌ی خطی ندارند بنابراین برای ارائه‌ی یک رابطه مناسب از توابع لگاریتمی استفاده شده است. رابطه‌ی ارائه شده و محدودیت‌های آن در این بررسی که به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات فروسیمان می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_c (MPa) = 10(\log_{10} \left(\left(\frac{c}{w} \right)^{10} \times \frac{Fa}{c} \right)) + \frac{W - S}{50} + N + M \quad (5)$$

$$N = \left(\frac{n}{Binder} \right) \times 200 \times \log_{10} \left(\frac{c}{w} \right) \quad (6)$$

$$M = \left(\frac{m}{Binder} \right) \times 80 \times \log_{10} \left(\frac{c}{w} \right) \quad (7)$$

که محدودیت‌های آن به صورت زیر می‌باشد:

$$1.8 < \frac{c}{w} < 2.9, \quad 2 < \frac{Fa}{c} < 3, \quad 0 < s < 250,$$

$$0 < \frac{n}{Binder} < 0.1, \quad 0 < \frac{m}{Binder} < 0.15$$

در روابط بالا f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات، $\frac{c}{w}$ نسبت وزنی سیمان به آب، $\frac{Fa}{c}$ نسبت وزنی ریزدانه به سیمان، w وزن آب، s

میزان اسلامپ به میلی‌متر، $\frac{n}{Binder}$ نسبت وزنی نانوسیلیس به مواد سیمانی و $\frac{m}{Binder}$ نسبت وزنی میکروسیلیس به مواد سیمانی

می‌باشد.

۳- پیش‌بینی مقاومت فشاری و طراحی ملات فروسیمان

۳-۱- پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه

به منظور بررسی صحت رابطه‌ی ارائه شده در پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات فروسیمان، از تحقیقات پیشینان و نتایج آزمایشگاهی آنها که تحقیقاتی بر روی تاثیر نانو ذرات بر ملات مورد کاربرد در اعضای فروسیمان انجام شد استفاده شده است [۱۶]. در این بررسی ۲۴ طرح اختلاط مختلف که حاوی ۲ نوع نسبت ریزدانه به مواد سیمان و سه نوع نسبت آب به سیمان مختلف می‌باشد در نمونه‌هایی با ابعاد مکعبی ۵ سانتی‌متری ساخته شد، درصد نانو ذرات در نمونه‌ها از ۰ تا ۳ متغیر می‌باشد، سپس مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. طرح اختلاط‌ها و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آنها به شرح زیر می‌باشد.

جدول ۱: جدول طرح اختلاط ملات فروسیمان و مقاومت ۲۸ روزه

| شماره طرح اختلاط | $\frac{Fa}{Binder}$ | $\frac{W}{Binder}$ | سیمان (gr) | نانو سیلیس (gr) | ریزدانه (gr) | مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa) | پیش‌بینی شده با رابطه (MPa) |
|------------------|---------------------|--------------------|------------|-----------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| ۱ | ۲ | ۰.۳۵ | ۴۵۰ | ۰ | ۹۰۰ | ۵۸.۷ | ۵۱.۷ |
| ۲ | ۲ | ۰.۳۵ | ۴۴۵.۵ | ۴.۵ | ۹۰۰ | ۶۲.۷ | ۵۲.۲۶ |
| ۳ | ۲ | ۰.۳۵ | ۴۴۱ | ۹ | ۹۰۰ | ۶۸.۲ | ۵۲.۷۵ |
| ۴ | ۲ | ۰.۳۵ | ۴۳۶.۵ | ۱۳.۵ | ۹۰۰ | ۷۳.۳ | ۵۳.۲۱ |
| ۵ | ۲.۵ | ۰.۳۵ | ۴۵۰ | ۰ | ۱۱۲۵ | ۵۵.۷ | ۵۲.۷۲ |
| ۶ | ۲.۵ | ۰.۳۵ | ۴۴۵.۵ | ۴.۵ | ۱۱۲۵ | ۶۰.۵ | ۵۳.۲۳ |
| ۷ | ۲.۵ | ۰.۳۵ | ۴۴۱ | ۹ | ۱۱۲۵ | ۶۵.۸ | ۵۳.۷۲ |
| ۸ | ۲.۵ | ۰.۳۵ | ۴۳۶.۵ | ۱۳.۵ | ۱۱۲۵ | ۷۰.۵ | ۵۴.۱۸ |
| ۹ | ۲ | ۰.۴ | ۴۵۰ | ۰ | ۹۰۰ | ۵۰.۸ | ۴۶.۴۰ |
| ۱۰ | ۲ | ۰.۴ | ۴۴۵.۵ | ۴.۵ | ۹۰۰ | ۵۴.۵ | ۴۶.۷۹ |
| ۱۱ | ۲ | ۰.۴ | ۴۴۱ | ۹ | ۹۰۰ | ۵۷.۱ | ۴۷.۱۷ |
| ۱۲ | ۲ | ۰.۴ | ۴۳۶.۵ | ۱۳.۵ | ۹۰۰ | ۶۲.۷ | ۴۷.۵۲ |
| ۱۳ | ۲.۵ | ۰.۴ | ۴۵۰ | ۰ | ۱۱۲۵ | ۴۷.۳ | ۴۷.۳۷ |
| ۱۴ | ۲.۵ | ۰.۴ | ۴۴۵.۵ | ۴.۵ | ۱۱۲۵ | ۴۸.۲ | ۴۷.۷۶ |
| ۱۵ | ۲.۵ | ۰.۴ | ۴۴۱ | ۹ | ۱۱۲۵ | ۵۵.۲ | ۴۸.۱۴ |
| ۱۶ | ۲.۵ | ۰.۴ | ۴۳۶.۵ | ۱۳.۵ | ۱۱۲۵ | ۵۹.۲ | ۴۸.۴۹ |
| ۱۷ | ۲ | ۰.۵ | ۴۵۰ | ۰ | ۹۰۰ | ۳۶.۶ | ۳۷.۶۱ |
| ۱۸ | ۲ | ۰.۵ | ۴۴۵.۵ | ۴.۵ | ۹۰۰ | ۳۸.۹ | ۳۷.۸۱ |
| ۱۹ | ۲ | ۰.۵ | ۴۴۱ | ۹ | ۹۰۰ | ۴۰.۳ | ۳۷.۹۹ |
| ۲۰ | ۲ | ۰.۵ | ۴۳۶.۵ | ۱۳.۵ | ۹۰۰ | ۴۱.۸ | ۳۸.۱۴ |
| ۲۱ | ۲.۵ | ۰.۵ | ۴۵۰ | ۰ | ۱۱۲۵ | ۳۴.۴ | ۳۸.۵۸ |
| ۲۲ | ۲.۵ | ۰.۵ | ۴۴۵.۵ | ۴.۵ | ۱۱۲۵ | ۳۷.۴ | ۳۸.۷۸ |
| ۲۳ | ۲.۵ | ۰.۵ | ۴۴۱ | ۹ | ۱۱۲۵ | ۳۸.۵ | ۳۸.۹۶ |
| ۲۴ | ۲.۵ | ۰.۵ | ۴۳۶.۵ | ۱۳.۵ | ۱۱۲۵ | ۴۰.۸ | ۳۹.۱۱ |

همچنین تحقیقاتی بر روی بهینه‌سازی ملات سیمانی انجام شده است. در این تحقیقات با استفاده از آیین‌نامه ACI، ۲۸ طرح اختلاط مختلف که حاوی ۴ نوع نسبت ریزدانه به سیمان و ۵ نوع نسبت آب به سیمان مختلف می‌باشد را در نمونه‌هایی به ابعاد مکعب‌های ۱۰ میلی متر ساخته و مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزهی آنها گزارش شده است [۱۰] که به صورت زیر می‌باشد:

جدول ۲: جدول طرح اختلاط ملات سیمانی و مقاومت ۲۸ روزه

| شماره طرح اختلاط | $\frac{Fa}{Binder}$ | $\frac{W}{Binder}$ | سیمان (kg/m ³) | ریزدانه (kg/m ³) | درصد فوق‌روان کننده | اسلامپ (mm) | مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa) | مقاومت فشاری پیش‌بینی شده با رابطه (MPa) |
|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------------|---|
| ۱ | ۲ | ۰.۴۰۰ | ۷۰۲ | ۱۴۰۴ | ۰ | ۸ | ۴۷.۸۷ | ۴۸.۲۳ |
| ۲ | ۲ | ۰.۴۲۵ | ۶۹۰ | ۱۳۸۰ | ۰ | ۲۷ | ۴۷.۵۳ | ۴۵.۵۳ |
| ۳ | ۲ | ۰.۴۵۰ | ۶۷۸ | ۱۳۵۷ | ۰ | ۹۶ | ۴۳.۷۰ | ۴۱.۸۹ |
| ۴ | ۲ | ۰.۴۷۵ | ۶۶۷ | ۱۳۳۴ | ۰ | ۱۳۱ | ۳۹.۸۰ | ۳۹.۰۴ |
| ۵ | ۲ | ۰.۵۰۰ | ۶۵۶ | ۱۳۱۲ | ۰ | ۲۱۳ | ۳۸.۱۷ | ۳۵.۴۱ |
| ۶ | ۲.۲۵ | ۰.۴۰۰ | ۶۶۱ | ۱۴۸۸ | ۰ | ۶ | ۵۴.۰۴ | ۴۸.۵۴ |
| ۷ | ۲.۲۵ | ۰.۴۲۵ | ۶۵۰ | ۱۴۶۳ | ۰ | ۱۵ | ۵۱.۸۹ | ۴۵.۹۴ |
| ۸ | ۲.۲۵ | ۰.۴۵۰ | ۶۴۰ | ۱۴۴۰ | ۰ | ۲۸ | ۴۷.۹۲ | ۴۳.۴۰ |
| ۹ | ۲.۲۵ | ۰.۴۷۵ | ۶۳۰ | ۱۴۱۷ | ۰ | ۶۰ | ۴۴.۶۱ | ۴۰.۶۷ |
| ۱۰ | ۲.۲۵ | ۰.۵۰۰ | ۶۲۰ | ۱۳۹۵ | ۰ | ۱۳۹ | ۳۹.۷۸ | ۳۷.۰۴ |
| ۱۱ | ۲.۵ | ۰.۴۰۰ | ۶۲۵ | ۱۵۶۲ | ۰ | ۵ | ۵۲.۹۳ | ۴۸.۶۷ |
| ۱۲ | ۲.۵ | ۰.۴۲۵ | ۶۱۵ | ۱۵۳۸ | ۰ | ۱۵ | ۵۱.۲۷ | ۴۶.۱۲ |
| ۱۳ | ۲.۵ | ۰.۴۵۰ | ۶۰۶ | ۱۵۱۴ | ۰ | ۳۰ | ۴۶.۶۱ | ۴۳.۴۷ |
| ۱۴ | ۲.۵ | ۰.۴۷۵ | ۵۹۷ | ۱۴۹۲ | ۰ | ۸۹ | ۴۳.۷۳ | ۴۰.۲۸ |
| ۱۵ | ۲.۵ | ۰.۵۰۰ | ۵۸۸ | ۱۴۷۰ | ۰ | ۱۷۹ | ۳۹.۷۱ | ۳۶.۳۸ |
| ۱۶ | ۲.۷۵ | ۰.۴۰۰ | ۵۹۲ | ۱۶۲۸ | ۰ | ۱۰ | ۵۱.۷۵ | ۴۸.۶۹ |
| ۱۷ | ۲.۷۵ | ۰.۴۲۵ | ۵۸۳ | ۱۶۰۴ | ۰ | ۱۸ | ۵۱.۰۳ | ۴۶.۱۲ |
| ۱۸ | ۲.۷۵ | ۰.۴۵۰ | ۵۷۵ | ۱۵۸۱ | ۰ | ۴۵ | ۴۴.۵۷ | ۴۳.۳۱ |
| ۱۹ | ۲.۷۵ | ۰.۴۷۵ | ۵۶۷ | ۱۵۵۹ | ۰ | ۹۵ | ۴۱.۸۴ | ۴۰.۲۶ |
| ۲۰ | ۲.۷۵ | ۰.۵۰۰ | ۵۵۹ | ۱۵۳۷ | ۰ | ۱۸۹ | ۳۹.۷۵ | ۳۶.۳۷ |
| ۲۱ | ۲.۲۵ | ۰.۳۵۰ | ۶۸۴ | ۱۵۳۸ | ۱.۸۵ | ۶۵ | ۵۶.۵۳ | ۵۲.۶۶ |
| ۲۲ | ۲.۲۵ | ۰.۳۷۵ | ۶۷۲ | ۱۵۱۳ | ۱.۱۵ | ۶۱ | ۴۸.۹۴ | ۴۹.۹۴ |
| ۲۳ | ۲.۲۵ | ۰.۴۰۰ | ۶۶۱ | ۱۴۸۸ | ۱.۲۵ | ۹۰ | ۴۸.۰۴ | ۴۶.۸۶ |
| ۲۴ | ۲.۲۵ | ۰.۴۲۵ | ۶۵۰ | ۱۴۶۳ | ۰.۵ | ۹۰ | ۴۴.۷۵ | ۴۴.۴۴ |
| ۲۵ | ۲.۵ | ۰.۳۵۰ | ۶۴۵ | ۱۶۱۲ | ۲.۲ | ۶۲ | ۵۴.۸۸ | ۵۲.۸۰ |
| ۲۶ | ۲.۵ | ۰.۳۷۵ | ۶۳۵ | ۱۵۸۶ | ۱.۸۵ | ۷۵ | ۵۲.۳۵ | ۴۹.۸۵ |
| ۲۷ | ۲.۵ | ۰.۴ | ۶۲۵ | ۱۵۶۲ | ۱.۳۵ | ۷۲ | ۴۹.۷۰ | ۴۷.۳۳ |
| ۲۸ | ۲.۵ | ۰.۴۲۵ | ۶۱۵ | ۱۵۳۸ | ۱.۲۵ | ۶۷ | ۴۶.۷۷ | ۴۵.۰۸ |

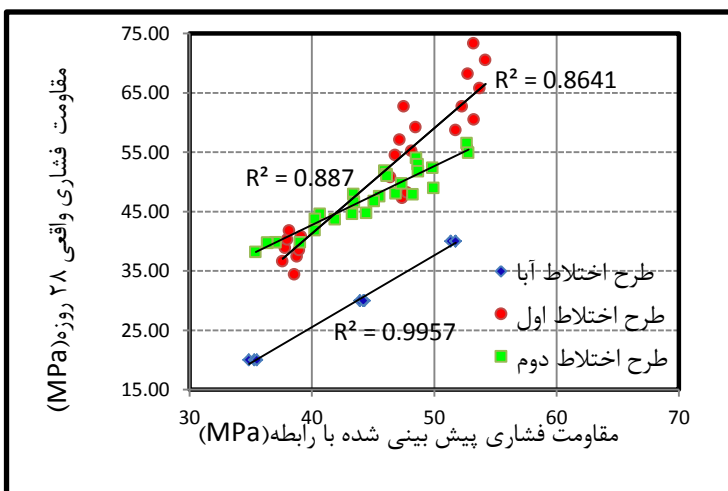
۲-۳- طراحی و پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه

با توجه به اینکه در آیین‌نامه آبا بر اساس خصوصیات شن و درصد شکستگی سنگدانه‌ها طرح اختلاط بتن را مشخص می‌شود؛ استفاده از این آیین‌نامه برای ملات فروسیمان مناسب به نظر نمی‌رسد اما با بعضی فرضیات و تغییرات در این روش، می‌توان از این آیین‌نامه برای محاسبه طرح اختلاط ملات فروسیمان استفاده کرد. این طرح اختلاط‌ها در مقاومت‌های مختلف و با فرض صد درصد شکسته بودن سنگدانه‌ها تنظیم شده است. بزرگترین بعد دانه‌ها ۴.۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مدول نرمی کلیه‌ی طرح اختلاط‌ها را برابر با کمترین حالت ممکن یعنی ۳ فرض شده است. مقدار شن موجود در ملات برابر صفر فرض شده است. وزن مخصوص: سیمان ۳.۱۰، ماسه ۲.۵ و آب ۱ در نظر گرفته شده است. اوزان ارائه شده برای حجم یک متر مکعب می‌باشند و درصد فوق‌روان کننده نسبت به سیمان در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مشخصات طرح اختلاط با روش آبا

| شماره طرح اختلاط | مقاومت فشاری طرح (MPa) | مقاومت فشاری پیش‌بینی شده با رابطه (MPa) | درصد فوق‌روان کننده | W/C | آب (kg) | سیمان (kg) | ریزدانه (kg) |
|------------------|------------------------|--|---------------------|------|---------|------------|--------------|
| ۱ | ۲۰ | ۳۴.۸۷ | ۰ | ۰.۵۴ | ۲۸۰ | ۵۲۰ | ۱۱۴۶ |
| ۲ | ۳۰ | ۴۴.۲۹ | ۰ | ۰.۴۳ | ۳۴۹ | ۸۱۸ | ۸۶۹ |
| ۳ | ۲۰ | ۳۵.۳۰ | ۰.۵ | ۰.۵۶ | ۲۶۰ | ۴۶۷ | ۱۳۷۳ |
| ۴ | ۳۰ | ۴۳.۹۳ | ۰.۵ | ۰.۴۴ | ۲۸۲ | ۶۴۲ | ۱۱۷۷ |
| ۵ | ۴۰ | ۵۱.۳۵ | ۰.۵ | ۰.۳۶ | ۳۰۷ | ۸۶۴ | ۹۳۵ |
| ۶ | ۲۰ | ۳۵.۵۱ | ۱ | ۰.۵۶ | ۲۳۸ | ۴۲۷ | ۱۴۶۱ |
| ۷ | ۳۰ | ۴۴.۲۱ | ۱ | ۰.۴۴ | ۲۵۸ | ۵۸۷ | ۱۲۸۱ |
| ۸ | ۴۰ | ۵۱.۷۶ | ۱ | ۰.۳۶ | ۲۸۱ | ۷۹۰ | ۱۰۶۰ |

۴- تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌ها و مقایسه با روش‌های آماری



نمودار ۱- همبستگی رابطه و خطوط برازش

رابطه‌ی ارائه شده در این بررسی و محدودیت‌های آن برای سه طرح اختلاط متفاوت که برای ساخت ملات فروسیمان و ملات سیمانی طراحی شده اند مورد بررسی قرار گرفت و مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه‌ی آنها پیش‌بینی شد. در نمودار ۱، همبستگی رابطه برای هر طرح و همچنین خط برازش مقاومت‌های آزمایشگاهی پیش‌بینان و پیش‌بینی ترسیم شده است که انحراف معیار هر یک از آنها مشخص شده است. هرچه عدد انحراف معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر دقت بالاتر پیش‌بینی مقاومت فشاری می‌باشد. در طرح اختلاط اول از نانوسیلیس در ساخت ملات فروسیمان استفاده شده است ولی عدد اسلامپ

آن گزارش نشده است. در طرح اختلاط دوم از مواد نانو و میکروسیلیس استفاده نشده ولی عدد اسلامپ آن گزارش شده است. اعداد طرح اختلاط در هر دو تحقیق در بین محدودیت‌های رابطه صدق می‌کنند. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، انحراف معیار طرح اختلاط اول برابر ۰.۸۶ و طرح اختلاط دوم برابر ۰.۸۸ می‌باشد دلیل این اختلاف می‌تواند نابرابری تعداد طرح‌های ساخته شده باشد. انحراف معیار پیش‌بینی در طرح اختلاط آبا ۰.۹۹ می‌باشد که نشان از دقت بالای پیش‌بینی رابطه می‌باشد. البته مقاومت‌های فرض شده در این طرح اعداد استخراج شده از آیین‌نامه آبا می‌باشد و اگر نمونه‌های واقعی در آزمایشگاه ساخته شود و مورد آزمایش قرار بگیرند احتمال ایجاد خطا و کاهش عدد انحراف معیار می‌باشد.

از مزیت‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و یا ملات سیمانی با استفاده از رابطه ۵، عدم نیاز به طرح اختلاط‌های دیگر می‌باشد، اما در پیش‌بینی با روش‌های آماری به تعداد مشخصی از مقاومت‌های فشاری همراه با طرح اختلاط آنها نیاز می‌باشد. برای مثال در رابطه Scheffe اگر فقط از سه پارامتر در ساخت ملات استفاده کنیم، حداقل به ۹ طرح اختلاط که مقاومت فشاری آن‌ها نیز مشخص باشد نیازمندیم. هرچه تعداد پارامترها افزایش یابد تعداد طرح اختلاط‌های مورد نیاز نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد؛ اما در رابطه ارائه شده در این پژوهش تعداد پارامترهای استفاده شده اهمیتی در کارکرد رابطه ندارد و فقط باید محدودیت‌های رابطه در طرح اختلاط‌ها صادق باشند. از معایب پیش‌بینی با رابطه Scheffe حل ماتریسی این روش می‌باشد. در این روش بایستی معکوس ماتریس‌های تشکیل شده از اعداد طرح محاسبه شود و در ماتریس جواب ضرب شده تا ضرایب ثابت مشخص شوند و گاهی اوقات اگر اعداد طرح اختلاط به یکدیگر نزدیک باشند ماتریس معکوس به سمت بی‌نهایت نزدیک شده و نمی‌توان ماتریس ضرایب را بدست آورد. مطالعات نشان داده که اگر برای یک گروه از طرح اختلاط‌ها یک رابطه Scheffe نوشته شود این رابطه فقط در همان گروه طرح پاسخ می‌باشد و می‌تواند پیش‌بینی مناسبی داشته باشد و اگر همان رابطه را با یک گروه طرح اختلاط دیگر امتحان شود با خطای زیادی مواجه می‌شود. در این تحقیق نشان داده شد تغییر در روش طرح اختلاط تاثیر زیادی در کارایی و دقت رابطه نمی‌گذارد.

از مزایای پیش‌بینی با کمک رابطه عدم نیاز به نمونه واقعی و آزمایشگاهی می‌باشد ولی در روش‌های دیگر بایستی نمونه‌های ساخته شده در دسترس باشد تا بتوان مقاومت فشاری آن‌ها را پیش‌بینی کرد، از جمله تست‌های غیر مخرب مانند التراسونیک که برای پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه بایستی تک‌تک طرح اختلاط‌ها ساخته شده و مورد آزمایش قرار بگیرند. در روش‌های آماری نیز حداقل به تعدادی مقاومت فشاری مشخص از طرح‌ها نیاز است تا بتوان رابطه‌ی مناسبی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری نوشت.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

۱-۵- در این پژوهش با ارائه‌ی یک رابطه مناسب همراه با محدودیت‌های منطقی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات فروسیمان پیش‌بینی شد.

۲-۵- با توجه به بررسی‌های بعمل آمده می‌توان با انتخاب پارامترها و نسبت‌های صحیح آنها و محدودیت‌های مناسب علاوه بر پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات فروسیمان که همراه با اثرات میکرو و نانو سیلیس می‌باشد را با تقریب نسبتاً خوبی پیش‌بینی کرد.

۳-۵- بررسی‌ها نشان داد پیش‌بینی مقاومت فشاری با استفاده از روابطی که با توجه به نسبت‌های وزنی طرح اختلاط نوشته شده باشد از دقت و سرعت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر از جمله روش‌های آماری و یا تست‌های غیرمخرب برخوردار می‌باشد، همچنین استفاده از یک رابطه جامع که در طرح‌های مختلف کاربرد داشته باشد از روش‌های آماری مناسب‌تر و کاربردی‌تر به نظر می‌رسد.

۴-۵- با توجه به رابطه‌ی ارائه شده تاثیر $\frac{c}{w}$ نسبت به $\frac{Fa}{c}$ در مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات فروسیمان بیشتر می‌باشد.

۶- مراجع

- [1]. Sasiekalaa, K., and R. Malathy. "A Review Report On Mechanical Properties Of Ferrocement With Cementitious Materials." *International Journal of Engineering*1, 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. توسعه ی ساخت المان های کم ضخامت سازها ی با بهره گیری از نانو ذرات SiO_2 . *مجله تحقیقات بتن*، سال سوم، شماره ۲، زمستان، (۱۳۸۹).
- [9]. Dvorkin, L., A. Bezusyak, N. Lushnikova, and Y. Ribakov. "Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture." *Construction and Building Materials* 37 (2012): 851-864.
- [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]. Shannag, M. Jamal. "Bending behavior of ferrocement plates in sodium and magnesium sulfates solutions." *Cement and Concrete Composites* 30, no. 7 (2008): 597-602.
- [13]. 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.
- [14]. Arif, Mohammed, and Surendra K. Kaushik. "Mechanical behaviour of ferrocement composites: an experimental investigation." *Cement and Concrete Composites* 21, no. 4 (1999): 301-312.
- [15]. Ramli, Mahyuddin, and Amin AkhavanTabassi. "Mechanical behaviour of polymer-modified ferrocement under different exposure conditions: An experimental study." *Composites Part B: Engineering* 43, no. 2 (2012): 447-456.
- [16]. Booshehrian, Abbas, and Payam Hosseini. "Effect of nano-SiO2 particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements." *Concrete Research Letters* 2, no. 1 (2011): 167-180.
- [۱۷]. مدندوست، رحمت، نریمانزاده، نادر، قویدل، رضا، احسانی، روح الله، ارزیابی مقاومت فشاری بتن با استفاده از روش غیر مخرب اولتراسونیک و به کمک سیستم شبکه عصبی مصنوعی GMDH. *هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران*، اردیبهشت ۱۳۸۸
- [18]. Han, Sang-Hun, Jin-Keun Kim, and Yon-Dong Park. "Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function." *Cement and Concrete Research* 33, no. 7 (2003): 965-971.
- [19]. Okere, C. E., D. O. Onwuka, S. U. Onwuka, and J. I. Arimanwa. "Simplex-based Concrete mix design." *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*5, no. 2 (2013): 46-55.

Design and Prediction of Ferro Cement Mortar Compressive strength

Mohammad Azimi Pour ¹; Hamid Eskandari ^{*2}

¹ B.Tech. Student of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

^{2*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari
University, Sabzevar, Iran

¹Mohammadhsu@gmail.com

^{2*}Hamidiisc@yahoo.com

¹09105102012

Subject Code: C

Abstract

Ferro cement mortar has been rising in structural members and construction of precast now days; mix design is one of the most important parts of Ferro cement mortar. With considering various parameters affecting the design Ferro cement and its mortar is one of the pillars of this type of concrete, also Prediction of the mortar compressive strength can have a great impact on the final product.

The purpose of this study is predicting the compressive strength of mortar considering the amount of material used in the construction of Ferro cement. In this research, in order to predict the compressive strength of Ferro cement mortars provided an equation containing cement weight, water, fine aggregate, Nano silica, Micro silica, and the slump value. The validity of this equation has been studied using experimental results available in the literature. Also various mixes are providing based by national mix design (ABA). The correctitude of these mixes has been reviewed according to the presented equation. Finally, this equation has been compared with other statistical methods used to the predicted compressive strength of cement mortar.

Results show that prediction using the presented equation in this paper to be applied for a variety of mixing cement mortar and standard deviation will be better than the other statistical methods.

Keywords: Mortar, Ferro Cement, Mix Design, Prediction, Compressive Strength