رابطه‌سازی مقاومت فشاری بتن با کارایی بالا

حمید اسکندری [۱] و امیر پاکزاد [۲]

[۱] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، پردیس دانشگاه حکیم سبزواری

[۲]Amirpakzadhsu@yahoo.com

چکیده

با توجه به کاربرد استفاده از بتنهای با کارایی بالا در دنیا به سبب سهولت، سرعت و کیفیت بهتر در اجرای این بتن لازم است که با آشنایی آن و همچنین استفاده از روشهای نوین طراحی و کاربرد حداکثری از ظرفیت مقاومتی جایگاه این نوع بتنها را در صنعت ساختمان کشور بهبود ببخشیم.

در این بررسی، به پارامترهای موثر و متغیرهای رابطه مقاومت فشاری بتنها با کارایی بالا و مقایسه برخی انواع روشهای رابطه‌سازی برای طرح اختلاط، پرداخته و رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و نسبت اختلاط هر یک از اجزای بتن با کارایی بالا مانند سیمان، آب، سنگدانه درشت و ریز، فوق‌روان‌کننده و مواد پودری، با توجه به استانداردها و مقاومت مورد نظر، مطالعه گردید.

نتایج نشان می‌دهد که روش رابطه‌سازی، بستگی به انتخاب نوع رابطه و متغیرها و تاثیر زیادی در محاسبه طرح اختلاط بتن دارد. همچنین، پارامترهای مختلفی را می‌توان در روشهای مختلف رابطه‌سازی ریاضی مقاومت فشاری بتن تاثیر داد و از نقش آنها برای بالا بردن دقت روابط استفاده کرد.

واژگان کلیدی: بتن با کارایی بالا، رابطه‌سازی، سیمان.

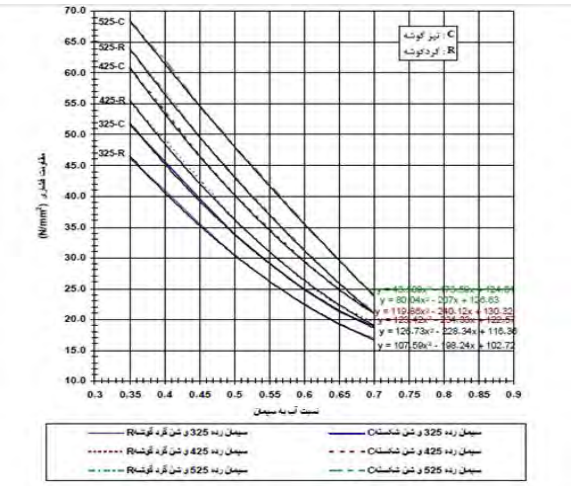
۱- مقدمه

روانی بتن یک فاکتور مهم برای قابلیت مناسب اجراست، که پس از فراگیرشدن استفاده از آرماتور در بتن بسیار مورد توجه قرار گرفت. برای حل این مساله تلاشهایی برای تولید بتن با کارایی بالا در دنیا شروع شد که در دهه ۸۰ میلادی در ژاپن، نوعی بتن با کارایی بالا 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 با کارایی بالای خودمتراکم 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 می باشد[۱] برخی موسسات تحقیقاتی در زمینه شناسایی مواد و سیستمهای پیشرفته در بتن، تلاش و خصوصیات آن را منتشر کردند.[۲]

در این میان با توجه به اینکه سیمان و فوق‌روان‌کننده باعث افزایش هزینه‌ها شده، ولی ترکیبات معدنی مانند پودر خاکستر بادی، پودر سرباره خورد شده یا پودر سنگ آهک سیالیت بتن را افزایش می‌دهد، بدون آنکه هزینه زیادی داشته باشد، امکان جداشدگی، خصوصا در حضور موانع با فواصل نزدیک وجود دارد، که با افزودنیهای مذکور می‌توان آن را کنترل کرد.[۳] در طراحی روشهای متعددی مانند فاکتوریل[۴] رایانه‌ای [۵] و استفاده از نمونه‌های با نسبتهای مختلف اجزا [۶] روش طراحی سیمپلکس[۷] تابع پخش خطی[۸] فاکتوریل[۱] دو مرحله‌ای[۹] روشهای پیش‌بینی مانند شبکه عصبی[۱۰] ، روش تاگوچی به عنوان یک روش طرح اختلاط بهینه بتن بر اساس داده های آماری و بر اساس نسبتهای جرمی و یا حجمی اجزا به کل بتن،[۱۱] بررسی‌شده‌است. با متدهای شناخته شده فعلی نمی توان به صورت قطعی و عددی ، رابطه‌سازی مقاومت فشاری را انجام داد.[۱۲]

تحقیقات و بررسی های انجام شده رابطه‌سازی طرح اختلاط بتن، به روشهای مختلف 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 کرده‌اند، لیکن مقادیر یادشده هیچکدام به تنهایی و مستقیما رابطه‌ای با مقاومت بتن ندارند. مثلا مقدار سیمان و یا آب به صورت جداگانه تاثیر مستقیم بر روی مقاومت بتن ندارد، درحالی که نسبت آب به سیمان با مقاومت فشاری بتن در ارتباط است. لذا در این پژوهش، هدف بدست‌آوردن تابع و رابطه مقاومت فشاری بتن خودتراکم، با استفاده از متغیرهای تصمیم مناسب و تاثیرگذار بر آن با روش ریاضی، می‌باشد.

نمودار(۱): رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری



۲- روشهای رابطه‌سازی

از انواع روشهای برنامه‌ریزی برای رابطه‌سازی می‌توان به برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی غیرخطی که هر کدام از این روشها بسته به نوع کاربرد مسئله و مدل تابع هدف، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.[۱۳]

۳- روشهای طرح اختلاط بتن

۳-۱- استاندارد:

در پروژه‌های عمرانی لازم است، برای تهیه بتن، ابتدا با بررسی انواع مصالح موجود در محل ، مشخصات آنها را با آزمایشات دقیق و مطابق با استانداردهای موجود مثل آبا ، ACI و BS تعیین و سپس با روشهای استاندارد شده ، طرح اختلاط یا نسبت وزنی یا حجمی اجزای تشکیل دهنده بتن را محاسبه نمود.

۳-۲- ریاضی:

روشهای مبتنی بر ریاضیات مانند تاگوچی، فاکتوریل ، سیمپلکس و با استفاده از توابع خطی و یا غیرخطی مانند تابع اسچف، برای تعیین طرح اختلاط بتن، معرفی شده‌اند.

در این روشها غالبا ابتدا یک مدل تابع ریاضی برای یکی از خصوصیات بتن مثل مقاومت فشاری و یا کارایی و ... انتخاب می‌شود، توابعی که غالبا در رابطه‌سازی تابع هدف استفاده می‌شود به صورت زیر هستند:

$$Y = \sum b_i * X_i + e$$

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

که در این 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 می‌باشد.

۴- سیمپلکس

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

$$\sum_{i=1}^{q} Xi = 1$$

که در آن q تعداد مولفه‌ها و X_i نسبت iامین مولفه است. چندجمله‌ای با استفاده از مدلهای ریاضی، معین می گردد. تابع چندجمله‌ای درجه n با q متغیر $X_1 \ldots\ldots X_q$ در فرم زیر داده شده است ، که در آن b_i ضریب ثابت است.

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + \cdots + \sum b_{i\ldots n} X_i \ldots X_n$$

$$1 \le i \le q\,, 1 \le i \le j \le q\,, 1 \le i \le \cdots \le n \le q$$

با بسط رابطه بالا داریم:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{15}X_1X_5 + b_{16}X_1X_6 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{25}X_2X_5 + b_{26}X_2X_6 + b_{34}X_3X_4 + b_{35}X_3X_5 + b_{36}X_3X_6 + b_{45}X_4X_5 + b_{46}X_4X_6 + b_{56}X_5X_6 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{55}X_5^2 + b_{66}X_6^2$$

در این روش نمی‌توان از نسبتهای اختلاط معمولی مانند ۱:۲:۴ یا ۱:۳:۶ استفاده کرد، چون لازمه روش سیمپلکس آنست که جمع کل مولفه‌ها یک باشد. بنابراین لازم است که یک دگرگونی در اجزای اصلی به اجزای مجازی داده شود. اجزای اصلی با نسبتهای اختلاط X_1 تا X_6 با شبکه چندوجهی سیمپلکس بررسی می‌شوند، رئوس چندوجهی را با A_1 تا A_6 بیان می‌کنیم.

۵- رابطه‌سازی

مقدار شش جز اختلاط به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شوند، عبارت از آب (X_1)، سیمان (X_2)، شن (X_3)، ماسه (X_4) ، پودر سنگ (X_5) ، میکروسیلیس (X_6) هستند.

۶- برنامه آزمایشگاهی

۶-۱-ساخت نمونه

با ساخت نمونه، آزمایشات مقاومت فشاری ۲۸ روزه، بر روی نمونه‌های مکعبی cm ۱۵*۱۵*۱۵ ، انجام شد، که در مخزن آب نگهداری و با یک دستگاه تست فشاری ، آزمایش گردید.

جدول(۱): محتویات سیمان

ترکیبات شیمیایی سیمان	مقدار (درصد)
CaO	۶۳
SiO_2	۲۱
Al_2O_3	۵.۵
Fe_2O_3	۳.۱
MgO	۲.۷
SO_3	۱.۹
K_2O	۰.۶۵
Na_2O	۰.۲۵

جدول(۲): مشخصات سیمان

اندازه الکها mm	درصد وزنی رد شده از هر الک آزمایشگاهی با سوراخ های مربع						
	۱/۱۹	۲/۳۶	۵/۰	۱۰/۰	۱۴/۰	۲۰/۰	۳۷/۵	۵۰/۰
۵ تا ۴۰	---	---	۰/۰ - ۵	۱۰ - ۴۰	۲۵ - ۵۵	۳۵ - ۷۰	۹۰ - ۱۰۰	۱۰۰
۵ تا ۲۰	---	---	۰/۰ - ۱۰	۳۰ - ۶۰	۴۰ - ۸۰	۹۰ - ۱۰۰	۱۰۰	
۵ تا ۱۴	---	---	۰/۰ - ۱۰	۵۰ - ۸۵	۹۰ - ۱۰۰	۱۰۰		

جدول(۳): مشخصات سنگدانه‌ها

	بادامی	نخودی	ماسه	فیلر
وزن مخصوص	۲.۲۳۷	۲.۳۲۵	۲.۱۴۹	۲.۰۷
وزن مخصوص ظاهری	۲.۳۳۵	۲.۳۳۷	۲.۱۵۵	۲.۱
جذب آب	٪۱	٪۱	٪۳.۱	٪۳

جدول(۴): مشخصات سیمان

وزن مخصوص (gr/cm^3)	۳.۱۱
سطح مخصوص (cm^2/gr)	۳۸۵۳
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	۱۳۴
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)	۳۲۵
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۸۵
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۴۰

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و بدست آوردن مقاومت فشاری و اسلامپ واقعی نمونه‌ها ، پاسخها و نسبتهای اختلاط که برای ساخت نمونه ها استفاده کردیم را در رابطه تابع هدف قرار داده و با حل دستگاه شش معادله و شش مجهول درجه اول، ضرایب ثابت را بدست می آوریم.

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

$$S = 1.52$$

که در آن y_{pre} ، y_{act} به ترتیب مقاومت فشاری بدست آمده از رابطه و آزمایشگاه و n تعداد طرحهای اختلاط و p تعداد متغیرهای تصمیم می باشد.

۶-۲-بازنویسی رابطه مقاومت فشاری:

$$\begin{aligned} Y = {} & -2.7986X_1 - .52X_2 - .1745X_3 - .3216X_4 + .8123X_5 + 6.701X_6 + ..0013X_1X_2 + .0015X_1X_3 \\ & + .0001X_1X_4 + .007X_1X_5 - .0051X_1X_6 - .0011X_2X_3 + .0082X_2X_4 + .021X_2X_5 \\ & - .0073X_2X_6 + .0012X_3X_4 - .0032X_3X_5 - .0056X_3X_6 - .0045X_4X_5 + .0032X_4X_6 \\ & + .0606X_5X_6 \end{aligned}$$

۷- تحلیل نتایج

تاثیر نسبت آب به سیمان و آب به مواد چسبنده بر مقاومت بتن زیاد است، در حالی که درصد فوق روان کننده تاثیر مستقیم چندانی بر مقاومت ندارد، همچنین با افزایش مقدار نسبت پودر سنگ به مواد سیمانی، مقاومت تحت تاثیر قرار

گرفته و کم می‌شود. استفاده از میکروسیلیس می‌تواند به افزایش مقاومت کمک کند، اما باعث افزایش قیمت تولید یک مترمکعب بتن نیز می‌گردد. با کاهش میزان آب به سیمان مقاومت افزایش می یابد، ولی کارایی بسیار کم می‌شود و گاهی بتن قابل استفاده نیست، برای ایجاد کارایی از فوق روان کننده استفاده می‌شود، استفاده از فوق‌روان‌کننده نیز باعث افزایش هزینه تولید می‌شود. در ساخت بتن با مقاومتهای بالا گرچه استفاده از افزودنیها به هزینه ساخت می‌افزاید، اما موارد استفاده از مقاومت بالای بتن این مساله را توجیه می‌کند.

شرایط استفاده از بتن با کارایی بالا غالبا ایجاب می‌کند برای بدست آوردن کارایی بهتر از سنگدانه‌های گردگوشه استفاده کنیم، اما این مساله مطابق با نمودارهای آیین‌نامه آبا منجر به کاهش مقاومت بتن می‌شود، به طوریکه مطابق نمودار(۱) 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 می‌دهد، بنابراین برای حصول مقاومت بالاتر در شرایط آب به سیمان یکسان، می‌توان با فراهم کردن شرایط مناسب برای کارایی و جریان اسلامپ مورد انتظار مانند استفاده از فوق روان کننده‌ها و مواد پودری از مصالح سنگدانه ای شکسته استفاده کرد.

ارزیابی بین مقاومتهای واقعی و ارائه شده توسط رابطه تابع هدف در شکل زیر نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده با قابلیت اعتماد مناسبی، می‌تواند مقاومت فشاری طرح اختلاط را محاسبه نماید.

۸- نتیجه گیری:

استفاده از بتن در پروژه‌های مختلف عمرانی به دلیل شرایط و امکان تولید برای ویژگیهای مختلف و همچنین استفاده در شرایط متنوع اقلیمی و کارگاهی، موجب گسترش انواع مختلف بتن مانند بتن با کارایی بالا شده‌است و استفاده از بتنهای با فناوری پیشرفته و روشهای نوین روز به روز گسترش یافته است. طراحی بهینه اختلاط بتن می‌تواند در صرفه جویی در هزینه‌ها و مصالح مصرفی و همچنین تولید با کیفیت نقش موثری داشته باشد. استفاده از روشهای ریاضی رابطه‌سازی از جمله روش شبکه سیمپلکس می‌تواند راهکار مناسب و سریعی برای اجزای تشکیل دهنده بتن با توجه به مقاومت فشاری مورد نظر باشد که با نتایج نزدیک به نتایج واقعی روندی مناسب را ارائه می‌دهد.

۹- مراجع:

1. -Alqadi, A.N.S. and Mustapha, K.N.B. and Naganathan, S. and Al-Kadi,Q.N.S. "Development of selfcompac- ting concrete using contrast constant factorial design", Journal of King Saud University – Engineering Sciences 25, 105–112, (2013).
2. -Murthy, K.N. and Rao N.A.V. and Reddy,R. and 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).
3. -Yahia. A. and Khayat.H.K. and Sayed.M. " Statistical modelling of the coupled effect of mix design and rebar spacing on restricted flow characteristics of SCC", Construction and Building Materials 37, 699–706, (2012).

4. -Nunes, S. and Figueiras, H. and Oliveira, P.M. and Coutinho, J.S. and Figueiras,J. "A methodology to assess robustness of SCC mixtures", Cement and Concrete Research 36, 2115–2122, (2006).
5. -Patton,G.M. And Shariatmadafi,A. and 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).
6. -Raharjo, D. and Subakti, A. "Mixed Concrete Optimiz- ation Using Fly Ash, Silica Fume and Iron Slag on the SCC's Compressive Strenght", Procedia Engineering 54 827 – 839, (2013).
7. -Okere, C.E. and Onwuka, D.O. and Onwuka, S.U. and Arimanwa, J.I. "Optimisation of concrete mix cost using Scheffe's simplex lattice theory", Journal of Innovative Research in Engineering and Sciences 4(1), ISSN : 2141-8225 (Print); ISSN : 2251-0524, (2013).
8. -Garbalińska,H. and Kowalski,S.J. and Staszak, M. " Linear and non-linear analysis of desorption processes in cement mortar", Cement and Concrete Research 40, 752–762, (2010).
9. -Abdelgader,H.S. "How to design concrete produced by a two-stage concreting method", Cement and Concrete Research 29, 331–337, (1999).
10. -Barış,S and Tansel İç,Y. and Şimşek,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).
11. -Prasad,B.K.R. and Eskandari, H. and 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).
12. -Odigure,J.O. "Optimization of cement mortar strength from raw mix containing metallic particles", Cement and Concrete Research 31, 51-56, (2001).
13. -Arora, J. "Introduction to optimum design", Academic Press, (2004).

.