

بهینه‌سازی مقاومت فشاری بتن خودمتراکم به روش شبکه سیمپلکس

حمید اسکندری^{۱*} و امیر پاکزاد^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، پردیس دانشگاه حکیم سبزواری

چکیده

استفاده زیاد از بتن‌های خودمتراکم به دلیل سهولت، سرعت و کیفیت بهتر در اجرا مستلزم بررسی روشهای نوین در طراحی بهینه آن می‌باشد. در این بررسی، پارامترهای موثر در تعیین متغیرهای تصمیم تابع هدف بهینه‌سازی بتن، معین و سپس به معرفی برخی روشهای بهینه‌سازی، پرداخته و بهترین مقدار اختلاط هر یک از اجزای بتن خودمتراکم 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 انتخاب روش بهینه‌سازی، بستگی به انتخاب نوع تابع هدف و متغیرهای تصمیم و نوع محدودیتها و تاثیر بسزایی در محاسبه طرح اختلاط بتن دارد. همچنین، پارامتر مقادیر اجزاء تاثیر زیادی بر مقاومت فشاری بتن دارند.

واژه‌های کلیدی: بتن خودمتراکم، بهینه‌سازی، طرح اختلاط، تابع هدف.



Mix Design Optimization of Self Consolidating Concrete Using Simplex Lattice

Hamid Eskandari ¹; Amir Pakzad ²

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

² M.Tech. Student of Structural Engineering, Pardis of Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Abstract

Self consolidating concrete's application is developed due to the ease construction, speed and quality in performance which cause new subject to investigation specially on mix design methods of optimal concrete.

In this study variabals parameter which effected in determining the optimum objective function's for concrete mix design by varies optimization techniques are compared to specifying the best value of any self compaction concrete's mixing components, such as cement, water, coarse aggregate and fine aggregate, powder material, superplastiser, according to the standards and requirement strength, were studied. Results show that, the value of the components have a big effect on the a self compaction concrete's compressive strength.

Keywords: *Self Consolidating Concrete, Optimization, Mix Design, Objective Function.*

۱- مقدمه

یکی از مشخصات اصلی بتن مقاومت فشاری است که خصوصیتی است که به وسیله آن می‌توان بسیاری از ویژگیهای بتن را تعیین نموده و یا تخمین زد (Onwuka, et all, ۲۰۱۳, ۵). مقاومت در حین فرآیند هیدراتاسیون و سخت شدگی در بتن، بدست می‌آید و تابع عوامل زیادی می‌باشد (Illinoiu, ۲۰۰۴, ۲). به دلیل نیاز به استفاده از بتنهای با روانی بالا برای بتن‌ریزی در سازه‌های با حجم زیاد آرماتور، فعالیتهای علمی زیادی برای ارائه راهکار مناسب انجام شد که سرانجام در دهه ۸۰ میلادی در ژاپن و طی تحقیقاتی برای تولید بتن با کارایی بالا، بتن خودمتراکم توسط اوکامورا معرفی شد و استفاده از آن در جهان به سرعت افزایش یافت. وی در سال ۱۹۹۸ بتن را معرفی کرد، 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، و آنرا بتن خودمتراکم نامید (Alqadi et all, ۲۰۱۳, ۵). برخی موسسات تحقیقاتی در زمینه شناسایی مواد و سیستمهای پیشرفته در بتن، تلاش و خصوصیات آن را منتشر کردند (Murthy et all, ۲۰۱۲, ۶). برای تولید بتن خودمتراکم از افزودنیهای مختلفی استفاده می‌شود که ارائه راهکارهایی برای کاهش مقادیر این اجزاء می‌تواند تاثیر زیادی بر صرفه‌جویی اقتصادی داشته باشد، در این میان با توجه به اینکه سیمان و فوق‌روان‌کننده (SP) باعث افزایش هزینه‌ها شده، ولی ترکیبات معدنی مانند پودر خاکستر بادی (PFA)، پودر سرباره خورده (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 (Sonebi, ۲۰۰۴, ۱۰) در طراحی سعی می‌کنیم، هزینه تولید را کاهش دهیم (Dvorkin et all, ۲۰۱۲, ۱۰) مفهوم بهینه‌سازی برای طراحی بتن به عنوان صرف کمترین هزینه با ایجاد ویژگیهای مناسب و موردنظر می‌باشد (Yeh, ۲۰۰۷, ۳) روشهای مختلفی در جهت طراحی توابع چند پارامتری برای طرح اختلاط بتن، مانند فاکتوریل (Nunes et all, ۲۰۰۶, ۵) روشهای عددی کامپیوتری (Mohammed et all, ۲۰۱۲, ۱۰) و استفاده از نمونه‌های با نسبتهای مختلف اجزا (Raharjo et all, ۲۰۱۳, ۱۲) روش طراحی سیمپلکس (Okere et all, ۲۰۱۳, ۵) تابع پخش خطی (Garbalinska et all, ۲۰۱۰, ۷) فاکتوریل، دو مرحله‌ای (Abdolghader, ۱۹۹۹, ۷) روش تجربی (Niak et all, ۲۰۱۲, ۶) روش عددی (Haidar et all, ۲۰۱۱, ۹) متد اوکامورا برای تولید بتن خود متراکم با مقدار زیاد مواد پودری و یک نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۳ (Nan Su, ۲۰۰۱, ۷)، روشهای پیش‌بینی مانند شبکه عصبی (Raghu et all, ۲۰۰۹, ۱۰)، روش تاگوچی (ozbay et all, ۲۰۰۹, ۴) و Box Behnken (Muthukumar et all, ۲۰۰۳, ۷)، در مسائل طراحی بهینه طرح اختلاط مخلوطهای با اجزای مختلف مورد توجه تحقیقات اخیر قرار گرفته است (Sivilevicius et all, ۲۰۱۱, ۵). تحقیقات و بررسی‌های انجام شده بر روی بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن، به روشهای 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 کرده‌اند. در این پژوهش با انتخاب مدل شبکه سیمپلکس برای بتن خودمتراکم با شش جزء اختلاط و با استفاده از متغیرهای تصمیم مناسب و تاثیرگذار بر مقاومت فشاری، این مدل به همراه محدودیتهای آیین‌نامه‌ای و اجرایی ارائه می‌گردد.

۲- شیوه پژوهش:

بررسی راهکارهای بهینه‌سازی مقاومت فشاری بتن می‌تواند کمک موثری به ایجاد ضریب اطمینان مناسب در محاسبات و طراحی سازه‌ها نماید و همچنین با استفاده از بیشترین ظرفیت مقاومتی ساختار بتن خصوصا بتن خودمتراکم که از افزودنیهای گرانتقیمت در ساخت آن استفاده می‌گردد، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها و منابع خواهد شد. بهینه‌سازی مقاومت بتن خودمتراکم با استفاده از پارامترهای تشکیل دهنده آن و مقادیر موثر در مقاومت فشاری و انتخاب مدل شبکه سیمپلکس برای تابع هدف مقاومت فشاری با برآزش نتایج آزمایشگاهی و همچنین تعیین روابط محدودیت، انجام خواهد شد.

۳- روشهای بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی روشهای مختلف ریاضی وجود دارد که می‌توان به روشهای خطی، غیرخطی، هندسی، توپولوژی، بهینه‌سازی شکل و دینامیکی پرداخت، که هر کدام از این روشها بسته به نوع کاربرد مسئله و مدل تابع هدف، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Rao, ۲۰۰۹), (Rivindran et all, ۲۰۰۶), (Sarma et all, ۱۹۹۸).

۴- روشهای طرح اختلاط بتن

۴-۱- ریاضی:

روشهای مبتنی بر ریاضیات مانند تاگوچی، فاکتوریل، سیمپلکس و با استفاده از توابع خطی و یا غیرخطی مانند تابع Scheffe، برای تعیین طرح اختلاط بتن، معرفی شده‌اند. ابتدا یک مدل ریاضی برای مقاومت فشاری انتخاب می‌گردد، توابعی که غالباً در رابطه‌سازی تابع هدف استفاده می‌شود به صورت زیر هستند:

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

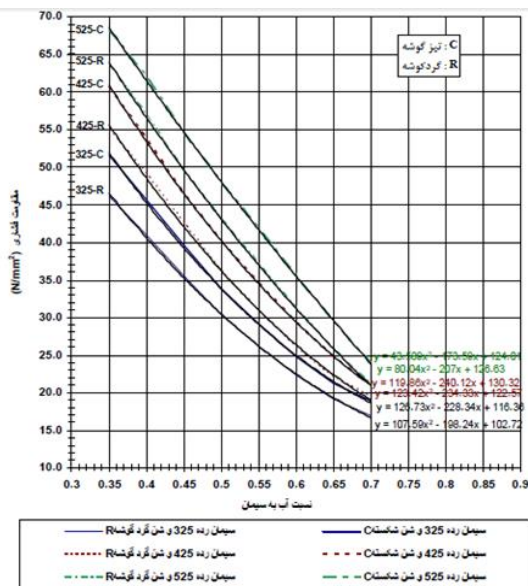
$$Y = \sum b_i * X_i + \sum b_{ij} * X_i * X_j + \sum b_{ii} * X_i^2 + e \quad (2)$$

که در این روابط Y تابع هدف یا مقاومت فشاری، b_i ضرایب ثابت رابطه، X_i متغیرهای تصمیم و e درصد خطای احتمالی در روابط می‌باشد.

۴-۲- استاندارد:

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، DIN، BS تعیین و سپس با روشهای استاندارد شده، طرح اختلاط یا مقادیر وزنی یا حجمی اجزای تشکیل دهنده بتن را محاسبه نمود. در این روشها توجه به فرضیات آیین‌نامه‌ها در مورد مصالح و شرایط پروژه بسیار مهم است. (BS۲۰۶-۱), (۲۳۷R-۰۷, ۳۶۳R-۹۲), (قدوسی، ۱۳۸۴).

شکل ۱: رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری



۵- 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 Scheffe برابر یک می‌باشد: (رابطه ۳)

$$\sum_{i=1}^q X_i = 1 \quad (3)$$

که در آن q تعداد مولفه‌ها و X_i نسبت آمین مولفه است. شبکه سیمپلکس (q,n) که توسط Scheffe در سال ۱۹۵۸ معرفی شد، نتیجه رابطه ویژگی موردنظر مثل مقاومت فشاری بتن را نشان می‌دهد. چندجمله‌ای با استفاده از مدلی که با روابط (۱) یا (۲) ارائه شد، معین می‌گردد. تابع چندجمله‌ای درجه n با q متغیر X_1, \dots, X_q در فرم زیر داده شده است، که در آن b_i ضریب ثابت است. (رابطه ۴)

$$Y = b. + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + \dots + \sum b_{i\dots n} X_i \dots X_n \quad (4)$$

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

با بسط ۴ رابطه برای شش جزء اختلاط رابطه ۵ حاصل می‌شود:

$$Y = b. + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{15} X_1 X_5 + b_{16} X_1 X_6$$

$$+ b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + b_{26} X_2 X_6 + b_{34} X_3 X_4 + b_{35} X_3 X_5 + b_{36} X_3 X_6$$

$$+ b_{45} X_4 X_5 + b_{46} X_4 X_6 + b_{56} X_5 X_6 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{55} X_5^2 + b_{66} X_6^2 \quad (5)$$

همچنین با توجه به رابطه ۳ می‌توان نوشت:

$$b. X_1 + b. X_2 + b. X_3 + b. X_4 + b. X_5 + b. X_6 = b. \quad (6)$$

$$X_1^2 = X_1 - X_1 X_2 - X_1 X_3 - X_1 X_4 - X_1 X_5 - X_1 X_6$$

$$X_2^2 = X_2 - X_2 X_1 - X_2 X_3 - X_2 X_4 - X_2 X_5 - X_2 X_6$$

$$X_3^2 = X_3 - X_3 X_1 - X_3 X_2 - X_3 X_4 - X_3 X_5 - X_3 X_6 \quad (7)$$

$$X_4^2 = X_4 - X_4 X_1 - X_4 X_2 - X_4 X_3 - X_4 X_5 - X_4 X_6$$

$$X_5^2 = X_5 - X_5 X_1 - X_5 X_2 - X_5 X_3 - X_5 X_4 - X_5 X_6$$

$$X_6^2 = X_6 - X_6 X_1 - X_6 X_2 - X_6 X_3 - X_6 X_4 - X_6 X_5$$

با جایگذاری روابط ۶ و ۷ در رابطه ۵ رابطه ۸ حاصل خواهد شد:

$$Y = \sum_{1 \leq i \leq q} a_i X_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq q} a_{ij} X_i X_j \quad (8)$$

$$a_i = b. + b_i + b_{ii}$$

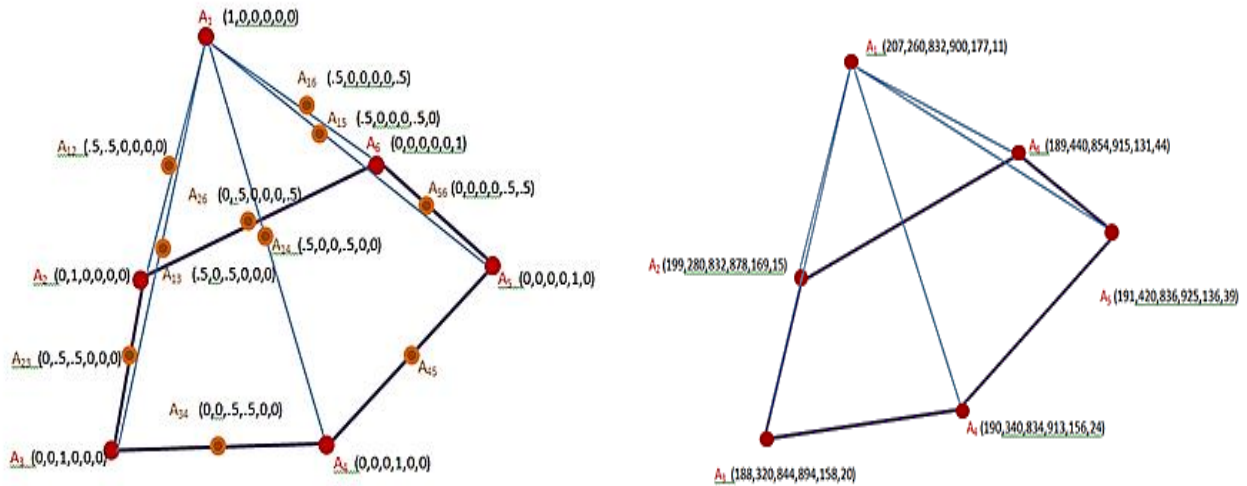
$$a_{ij} = b_{ij} - b_{ii} - b_{ij}$$

The first International conference on sustainable urban structure

در این روش نمی توان از نسبت های اختلاط معمولی مانند ۱:۲:۴ یا ۱:۳:۶ استفاده کرد، چون لازمه روش سیمپلکس آنست که جمع کل مولفه ها یک باشد. بنابراین 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 را با A_1 تا A_6 بیان می کنیم. Z را برای مولفه های حقیقی و X را برای مولفه های مجازی استفاده می کنیم لذا با یک ماتریس تبدیل داریم: $X = BZ$, $Z = AX$ و A ماتریس تبدیل مولفه های مجازی به واقعی و B معکوس A می باشد. اجزای واقعی را توسط رابطه ۵ برای اندازه گیری مقدار آب Z_1 ، سیمان Z_2 ، شن Z_3 ، ماسه Z_4 ، پودر سنگ Z_5 و میکروسیلیس Z_6 در نسبت های مربوط به آنها برای تست مقاومت مکعبی بتن، تبدیل می شود. همچنین مقدار فوق روان کننده در تمامی طرح های اختلاط یکسان در نظر گرفته می شود.

جدول ۱: مقادیر واقعی و مجازی اجزای تشکیل دهنده بتن

	آب	سیمان	شن	ماسه	پودر سنگ	میکرو سیلیس	آب	سیمان	شن	ماسه	پودر سنگ	میکرو سیلیس
۱	۲۰۷	۲۶۰	۸۳۲	۹۰۰	۱۷۷	۱۰,۸	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱۹۹	۲۸۰	۸۳۲	۸۷۸	۱۶۹	۱۴,۵	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۳	۱۸۸	۳۲۰	۸۴۴	۸۹۴	۱۵۸	۲۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۴	۱۹۰	۳۴۰	۸۳۴	۹۱۳	۱۵۶	۲۳,۵	۰	۰	۰	۱	۰	۰
۵	۱۹۱	۴۲۰	۸۳۶	۹۲۵	۱۳۶	۳۹	۰	۰	۰	۰	۱	۰
۶	۱۸۹	۴۴۰	۸۵۴	۹۱۵	۱۳۱	۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۷	۲۰۳	۲۷۰	۸۳۲	۸۸۹	۱۷۳	۱۲,۶۵	۰,۵	۰,۵	۰	۰	۰	۰
۸	۱۹۷,۵	۲۹۰	۸۳۸	۸۹۷	۱۶۷,۵	۱۵,۴	۰,۵	۰	۰,۵	۰	۰	۰
۹	۱۹۸,۵	۳۰۰	۸۳۳	۹۰۶,۵	۱۶۶,۵	۱۷,۱۵	۰,۵	۰	۰	۰,۵	۰	۰
۱۰	۱۹۹	۳۴۰	۸۳۴	۹۱۲,۵	۱۵۶,۵	۲۴,۹	۰,۵	۰	۰	۰	۰,۵	۰
۱۱	۱۹۸	۳۵۰	۸۴۳	۹۰۷,۵	۱۵۴	۲۷,۴	۰,۵	۰	۰	۰	۰	۰,۵
۱۲	۱۹۳,۵	۳۰۰	۸۳۸	۸۸۶	۱۶۳,۵	۱۷,۲۵	۰	۰,۵	۰,۵	۰	۰	۰
۱۳	۱۹۴,۵	۳۱۰	۸۳۳	۸۹۵,۵	۱۶۲,۵	۱۹	۰	۰,۵	۰	۰,۵	۰	۰
۱۴	۱۹۵	۳۵۰	۸۳۴	۹۰۱,۵	۱۵۲,۵	۲۶,۷۵	۰	۰,۵	۰	۰	۰,۵	۰
۱۵	۱۹۴	۳۶۰	۸۴۳	۸۹۶,۵	۱۵۰	۲۹,۲۵	۰	۰,۵	۰	۰	۰	۰,۵
۱۶	۱۸۹	۳۳۰	۸۳۹	۹۰۳,۵	۱۵۷	۲۱,۷۵	۰	۰	۰,۵	۰,۵	۰	۰
۱۷	۱۸۹,۵	۳۷۰	۸۴۰	۹۰۹,۵	۱۴۷	۲۹,۵	۰	۰	۰,۵	۰	۰,۵	۰
۱۸	۱۸۸,۵	۳۸۰	۸۴۹	۹۰۴,۵	۱۴۴,۵	۳۲	۰	۰	۰,۵	۰	۰	۰,۵
۱۹	۱۹۰,۵	۳۸۰	۸۳۵	۹۱۹	۱۴۶	۳۱,۲۵	۰	۰	۰	۰,۵	۰,۵	۰
۲۰	۱۸۹,۵	۳۹۰	۸۴۴	۹۱۴	۱۴۳,۵	۳۳,۷۵	۰	۰	۰	۰,۵	۰	۰,۵
۲۱	۱۹۰	۴۳۰	۸۴۵	۹۲۰	۱۳۳,۵	۴۱,۵	۰	۰	۰	۰	۰,۵	۰,۵



شکل ۲: شش وجهی سیمپلکس برای مقادیر واقعی و مجازی اجزای اختلاط

بهبودسازی

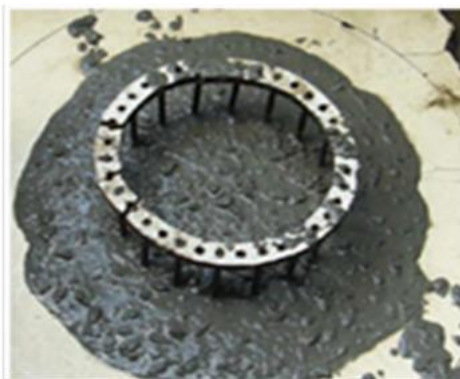
۵-۱- متغیرهای تصمیم:

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

۵-۲- تابع هدف:

با توجه به اصلاح مدل رابطه Scheffe برای طرح اختلاط بتن خودمتراکم با شش جزء معرفی شده، رابطه زیر را به عنوان تابع هدف مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

$$Y = \sum_{i=1}^6 a_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 6} a_{ij} X_i X_j \quad (9)$$



شکل ۳: آزمایش روانی بتن خودمتراکم

۵-۳- برنامه آزمایشگاهی

۵-۳-۱- ساخت نمونه و برازش نتایج و تعیین ضرایب تابع

هدف:

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

جدول ۲: مشخصات دانه بندی سنگدانه‌ها

درصد وزنی رد شده از هر الک				اندازه الکها mm
BS ۴	BS ۳	BS ۲	BS ۱	
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

جدول ۳: دانه بندی مصالح سنگی

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

جدول ۶: مقایسه نتایج تابع هدف با نتایج واقعی MP

شماره	مقاومت	مقاومت	مقاومت رابطه
۱	۳۰	۲۶,۲	۳۲
۲	۳۰	۲۸	۳۲,۵۳
۳	۳۰	۳۱,۵	۳۵
۴	۳۵	۳۳,۵	۳۰
۵	۳۵	۳۶	۳۷
۶	۳۵	۳۷,۵	۳۷,۳۴
۷	۳۰	۲۶,۲	۳۹
۸	۳۰	۲۸,۷	۳۶
۹	۳۰	۲۹,۵	۴۱
۱۰	۳۰	۳۱,۵	۳۸
۱۱	۳۵	۳۴,۲	۴۶
۱۲	۳۵	۲۹,۳	۳۱
۱۳	۳۵	۳۰,۴	۳۳
۱۴	۳۵	۳۳,۹	۴۲
۱۵	۳۵	۳۵,۶	۴۱
۱۶	۳۵	۳۲,۱	۳۳
۱۷	۴۰	۳۶,۶	۳۵
۱۸	۴۰	۳۷,۵	۴۹
۱۹	۴۰	۳۶,۴	۴۵
۲۰	۴۰	۳۷,۷	۴۲
۲۱	۴۰	۴۰,۱	۳۵

جدول ۴: مشخصات سیمان تیپ ۱-۳۲۵

۳,۱	وزن مخصوص (gr/cm ^۳)
۱	
۳۸	سطح مخصوص (cm ^۲ /gr)
۵۳	
۲۵	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ^۲)
۰	
۳۲	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ^۲)
۵	
۸۵	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۱۴	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۰	

جدول ۵: نتایج آزمایشگاهی سنگدانه‌ها

فیلر	ماسه	نخودی	بادامی	
۲,۰۷	۲,۱۴۹	۲,۳۲۵	۲,۳۳۷	وزن مخصوص
۲,۱	۲,۱۵۵	۲,۳۳۷	۲,۳۳۵	وزن مخصوص ظاهری
%۳	%۳,۱	%۱	%۱	جذب آب

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و بدست آوردن مقاومت فشاری و اسلامپ واقعی نمونه‌ها، پاسخها و نسبتهای اختلاط که برای ساخت نمونه‌ها استفاده کردیم را در رابطه تابع هدف قرار داده و با حل دستگاه ۲۱ معادله و ۲۱ مجهول درجه اول، ضرایب

ثابت را بدست می آوریم.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_{act} - y_{pre})^2}{(n-p)}} \quad (10)$$

$$S = 1.52$$

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

۴-۵ - روابط محدودیت تابع هدف:

با توجه به توصیه‌های آیین نامه‌های مختلف و همچنین شرایط محدود کننده محلی و کارگاهی می‌توان محدودیت مربوط به هر کدام از پارامترها را به صورت یک رابطه ریاضی تعیین نمود. در اینجا برخی از محدودیت‌های مذکور استخراج و عنوان شده و با تحلیل آنها و دیگر توصیه‌های موجود محدودیتها تنظیم می‌گردد.

جدول ۸: نمونه‌ای نسبت‌های پیشنهادی اختلاط

مقدار ماکزیمم	مقدار مینیمم	جز ترکیبی
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	پودرسنگ به چسبنده
۶,۴	۲,۷	سنگدانه به چسبنده
۰,۵۲	۰,۴	ریزدانه به کل سنگدانه
۵۰۰	۳۵۰ Kg	مقدار سیمان
۰,۳۹	۰,۳	آب به مواد سیمانی
۰,۷	۰,۶	نسبت سنگدانه
۱,۵	۱ Kg	مقدار فوق‌روان‌کننده
۱۵۰	۸۰ Kg	مقدار پودرسنگ
۱۲۰	۱۰۰	زمان اختلاط ثانیه

جدول ۷: نمونه‌ای نسبت‌های پیشنهادی اختلاط

مقدار ماکزیمم	مقدار مینیمم	جز ترکیبی
۰/۱۸۵	۰/۰۷	آب
۰/۲۵	۰/۱۰	سیمان
۰/۰۲۷	۰/۰۱۳	میکروسلیس
۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۴۶	روان‌کننده
۰/۴۴۲۴	۰/۴	سنگدانه درشت
۰/۲۹۲۴	۰/۲۵	سنگدانه ریز

جدول ۹: مقادیر پیشنهادی کمیته اروپایی

در سال ۲۰۰۵ برای طرح مخلوط بتن خودمتراکم

وزنی kg/m^3	حجمی m^3 lit/	
	۳۰۰-۳۸۰	پودر
		خمیر
۱۵۰-۲۱۰	۱۵۰-۲۱۰	آب
۷۵۰-۱۰۰۰	۲۷۰-۳۶۰	سنگدانه درشت
		سنگدانه ریز
	۰/۸۵-۱/۱	آب به پودر

۵-۵ - باز نویسی تابع هدف و محدودیتها:

The first International conference on sustainable urban structure

$$\begin{aligned}
 Y = & -1.7986X_1 - .1466X_7 + .1612X_7 - .2426X_7 + .9128X_8 + 4.7291X_8 + .0017X_1X_7 + .0011X_1X_7 - .0006X_1X_7 \\
 & + .008X_1X_8 - .0031X_1X_8 - .0004X_7X_7 + .0001X_7X_8 + .0046X_7X_8 - .0017X_7X_8 + .0003X_7X_8 \\
 & - .0024X_7X_8 - .0021X_7X_8 - .0006X_7X_8 + .0005X_7X_8 - .0296X_8X_8
 \end{aligned}$$

s.to:

$$161 \leq X_1 \leq 250$$

$$230 \leq X_7 \leq 550$$

$$2.7 \leq \frac{(X_7 + X_8)}{(X_7 + X_8)} \leq 6.4$$

$$.52 \leq \frac{(X_7)}{(X_7 + X_8)} \leq .4$$

$$.25 \leq \frac{(X_8)}{(X_7 + X_8)} \leq .55$$

$$.35 \leq \frac{(X_1)}{(X_7 + X_8)} \leq .55$$

$$.3 \leq \frac{(X_1)}{(X_7 + X_8 + X_8)} \leq .45$$

با استفاده از روشهای مختلف عددی می توان این مساله را بهینه سازی نموده و مقادیر بهینه را بدست آورد.

۶- تحلیل نتایج

تاثیر مقدار اجزای معرفی شده 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 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 افزودنیها به هزینه ساخت می افزاید، اما موارد استفاده از مقاومت بالای بتن این مساله را توجیه می کند.

شرایط استفاده از بتن خودمترکم غالبا ایجاب می کند برای بدست آوردن کارایی بهتر از سنگدانه های گردگوشه استفاده کنیم، اما این مساله مطابق با نمودارهای آیین نامه آبا منجر به کاهش مقاومت بتن می شود، به طوریکه مطابق شکل (۱) در سیمان با مقاومت ۵۲/۵ مگاپاسکال، 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 در شرایط آب به سیمان یکسان، می توان با فراهم کردن شرایط مناسب برای کارایی و جریان اسلامپ مورد انتظار مانند استفاده از فوق روان کننده ها و مواد پودری از مصالح سنگدانه های شکسته استفاده کرد.

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

۷- 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 خودمترکم شده‌است و استفاده از بتن‌های با فناوری پیشرفته و روش‌های نوین روز به روز گسترش یافته‌است. طراحی بهینه اختلاط بتن می‌تواند در صرفه‌جویی در هزینه‌ها و مصالح مصرفی و همچنین تولید با کیفیت نقش موثری داشته باشد. استفاده از روش‌های ریاضی بهینه‌سازی 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.

مراجع

- [۱] قدوسی، پ. و همکاران. "روش ملی طرح مخلوط بتن"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
- [۲] Abdelgader, H.S. (۱۹۹۹). *How to design concrete produced by a two-stage concreting method*, Cement and Concrete Research ۲۹, ۳۳۱-۳۳۷.
- [۳] ACI-۲۱۱R-۰۸, (۲۰۰۸). Reported by American Concrete Institute (ACI), Committee ۲۱۱.
- [۴] ACI-۲۳۷R-۰۷, (۲۰۰۷). Reported by American Concrete Institute (ACI), Committee ۲۳۷.
- [۵] ACI-۳۶۳-R-۹۲, (۱۹۹۷). Reported by American Concrete Institute (ACI), Committee ۳۶۳.
- [۶] Ahmadi-Nedushan, B., and Varaee, H. (۲۰۱۱). *Minimum Cost Design of Concrete Slabs using Particle Swarm Optimization with time Varying Acceleration Coefficients*, World Applied Sciences Journal ۱۳ (۱۲): ۲۴۸۴-۲۴۹۴, ISSN ۱۸۱۸-۴۹۵۲.
- [۷] Alqadi, A.N.S., Mustapha, K.N.B., Naganathan, S. and Al-Kadi, Q.N.S. (۲۰۱۳). *Development of selfcompacting concrete using contrast constant factorial design*, Journal of King Saud University – Engineering Sciences ۲۵, ۱۰۵-۱۱۲.
- [۸] Arora, J. (۲۰۰۴). *Introduction to optimum design*, Academic Press.
- [۹] Belegundu, A. D. and Tirupathi R. C. (۲۰۱۱). *Optimization concepts and applications in engineering*, Cambridge University Press.
- [۱۰] Bicher, B. and Schwoon, O. and Schlumpf, J. (۲۰۱۳). *Sika Concrete Handbook*, Sika Services AG.
- [۱۱] British Standards Institution (BSI). (۲۰۰۶). *Specification, performance, production and conformity*. London, BSI, c. BS ۲۰۶۷-۱:۲۰۰۶ Concrete – Part ۱.
- [۱۲] Dvorkin, L., Bezusyak, A., Lushnikova, N. and Ribako, Y. (۲۰۱۲). *Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture*, Construction and Building Materials ۳۷ ۸۵۱-۸۶۴.
- [۱۳] Garbalińska, H., Kowalski, S.J. and Staszak, M. (۲۰۱۰). *Linear and non-linear analysis of desorption processes in cement mortar*, Cement and Concrete Research ۴۰, ۷۵۲-۷۶۲.
- [۱۴] Haftka, R. T. (۱۹۹۲). *Elements of structural optimization*, Vol. ۱۱. Springer.
- [۱۵] Haidar, M., Ghorbel, E. and Toutanji, H. (۲۰۱۱). *Optimization of the formulation of micro-polymer concretes*, Construction and Building Materials ۲۵, ۱۶۳۲-۱۶۴۴.

The first International conference on sustainable urban structure

- [١٦] Ilinoiu, G. (٢٠٠٤). *Concrete Mix Design Optimized Approach*, Dimensi Teknik Sipil Vol ٦, NO. ١, Maret ٢٠٠٤: ٤٩ – ٥٦.
- [١٧] Luenberger, D. G. and Ye, Y. (٢٠٠٨). *Linear and nonlinear programming*, Vol. ١١٦. Springer.
- [١٨] Mohammed, M.H., Pusch, R., Al-Ansari and Knutsson, N.S. (٢٠١٢). *Optimization of Concrete by Minimizing Void Volume in Aggregate Mixture System*, Journal of Advanced Science and Engineering Research Vol ٢, No ٣, ٢٠٨-٢٢٢.
- [١٩] Murthy, K.N., Rao N.A.V., Reddy, R. and Reddy, V.V.S.M. (٢٠١٢). *Mix Design Procedure for Self Compacting Concrete*, IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) e-ISSN: ٢٢٥٠-٣٠٢١, p-ISSN: ٢٢٧٨-٨٧١٩, Volume ٢, Issue ٩, PP ٣٣-٤١.
- [٢٠] Muthukumar, M., Mohan, D. and Rajendran, M. (٢٠٠٣). *Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments*, Cement & Concrete Composites ٢٥, ٧٥١-٧٥٨.
- [٢١] Naik, T.R., Kumar, R., Rammeb, B.W. and Canpolat, F. (٢٠١٢). *Development of high-strength, economical self-consolidating concrete*, Construction and Building Materials ٣٠, ٤٦٣-٤٦٩.
- [٢٢] Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P.M., Coutinho, J.S. and Figueiras, J. (٢٠٠٦). *A methodology to assess robustness of SCC mixtures*, Cement and Concrete Research ٣٦, ٢١١٥-٢١٢٢.
- [٢٣] Okere, C.E., Onwuka, D.O., Onwuka, S.U. and Arimanwa, J.I. (٢٠١٣). *Optimisation of concrete mix cost using Scheffe's simplex lattice theory*, Journal of Innovative Research in Engineering and Sciences ٤(١), ISSN : ٢١٤١-٨٢٢٥ (Print); ISSN : ٢٢٥١-٥٥٢٤.
- [٢٤] Onwuka, D.O., Okere, C.E., Ibearugbulem, O.M. and Onwuka, S.U. (٢٠١٣). *Computer-Aided Design of Concrete Mixes*, International Journal Of Computational Engineering Research (ijceronline.com) Vol. ٣ Issue, ٢.
- [٢٥] Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu, A. and Ozbebek, H. (٢٠٠٩). *Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method*, Construction and Building Materials ٢٣, ٦٩٤-٧٠٢.
- [٢٦] Prasad, B.K.R., Eskandari, H. and Reddy, B.V.V. (٢٠٠٩). *Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN*, Construction and Building Materials ٢٣, ١١٧-١٢٨.
- [٢٧] Raharjo, D., Subakti, A. (٢٠١٣). *Mixed Concrete Optimization Using Fly Ash, Silica Fume and Iron Slag on the SCC's Compressive Strength*, Procedia Engineering ٥٤ ٨٢٧ – ٨٢٩.
- [٢٨] Rao, S. S. (٢٠٠٩). *Engineering optimization: theory and practice*, John Wiley & Sons.
- [٢٩] Ravindran, A., Gintaras V. R., and Kenneth, M. R. (٢٠٠٦). *Engineering optimization: Methods and applications*, John Wiley & Sons.
- [٣٠] Sarma, K. C. and Adeli, H. (١٩٩٨). *Cost optimization of concrete structures*, Journal of Structural Engineering ١٢٤, ٥, ٥٧٠-٥٧٨.
- [٣١] Sivilevicius, H., Podvezko, V. and Vakriniene, S. (٢٠١١). *The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture*, Construction and Building Materials ٢٥, ١١٥-١٢٢.
- [٣٢] Sonebi, M. (٢٠٠٤). *Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans*, Cement and Concrete Research ٣٤, ١١٩٩-١٢٠٨.
- Sua, N., Hsu, K.C. and Chai, H.W. (٢٠٠١). *A simple mix design method for self-compacting concrete*, [٣٣] Cement and Concrete Research ٣١, ١٧٩٩-١٨٠٧.