مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۹- شماره ۱ - سال ۱۴۰۳

www.ElitesJournal.ir

بررسی طرح اختلاط بتن بامقاومت بالا با هدف دستیابی به مقاومت فشاری بهینه توسط روش بهینه‌سازی

مسعود حقانی چگنی[۱*]، اصغر آقایی چگنی[۲]، امیررضا عزیزی[۳]، محمدحسین پوررجب[٤]، سعید بهاری‌پور[٥]

۱- دکترای مهندسی عمران-سازه، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۲-کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی،گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، خرم‌آباد، ایران

۳-دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، خرم‌آباد، ایران

٤-کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، کمیسیون مجریان‌ذی‌صلاح، سازمان نظام مهندسی ساختمان، خرم‌آباد، ایران

٥-دانشجوی دکترای مهندسی عمران-زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

*masoudhaghani89@gmail.com

ارسال: بهمن ماه ۱۴۰۲ پذیرش: فروردین ماه ۱۴۰۳

چکیده

سال‌هاست که در اکثر کشورهای دنیا از بتن با مقاومت بالا به‌صورت وسیع استفاده می‌شود. هدف جامعه بتن ایران نیز استفاده از بتن با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال تا سال ۱۴۰۴ و استفاده از آن در پروژه های اجرایی کشور است. از مزایای این نوع بتن می‌توان به مقاومت بالاتر، صرفه اقتصادی بیشتر، و همچنین به‌علت کاهش ابعاد تیر و ستون که سبب استفاده بهتر از فضاها می‌شود، اشاره کرد. از جمله موارد حساس تعیین کننده در تعیین خواص بتن با مقاومت بالا مصالح سازنده بتن می‌باشد. شبیه‌سازی و یافتن ترکیب بهینه برای اختلاط بتن با مقاومت بالا در این پژوهش توسط الگوریتم ازدحام ذرات[۱] انجام شده است. استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات جهت بهینه‌سازی طرح اختلاط، مستلزم تعریف تابع هزینه‌ای است که توسط الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شود. در این پژوهش سعی شد که بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا مورد بررسی قرار گیرد که در آن متغیرهای طراحی شامل مقادیر وزنی پارامترهای آب، سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهند که می‌توان مقاومت لازم را با افزایش درشت‌دانه تا سقف حداکثر مجاز تغییر داد. که با توجه به نوع مقاومت خود مصالح و ضریب کم آن در تابع هدف این کار صرفه اقتصادی لازم را دارد. رابطه مقاومت فشاری برای نتایج شبیه‌سازی پیچیده‌تر از تئوری است و می‌توان نتیجه گرفت که رابطه خطی بین اجزا برای تأمین مقاومت در عمل باقی نمی‌ماند و رفتار بتن در شبیه‌سازی متفاوت است.

[1] PSO: Particle Swarm Optimization

واژگان کلیدی: بتن با مقاومت بالا، الگوریتم ازدحام ذرات، مقاومت فشاری بتن، طرح اختلاط بتن.

۱- مقدمه

بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی از سه قسمت آب و سیمان و سنگ‌دانه تشکیل شده است که ۷۰ تا ۷۵ درصد آن را سنگ‌دانه تشکیل می‌دهد [۱]. بتن معمولی و سپس بتن با مقاومت بالا[1] سالیان سال است که تشکیل‌دهنده بخش اصلی سازه‌های بتنی بوده‌اند. اما نیاز به ساخت سازه‌های مرتفع‌تر، مقاوم‌تر و دارای المان‌های سازه‌ای با ابعاد کوچک‌تری و عمر طولانی‌تر محققان را وادار به جستجو و تحقیق برای ساخت بتن مقاوم‌تر و بادوام‌تر نمود [۲]. از سوی دیگر در عصر حاضر حجم تولید و استفاده از بتن در سازه‌ها، حتی در ساختمان‌های معمول مسکونی روبه افزایش است، درحالی‌که محدودیت سرمایه‌های موجود شرایط ویژه‌ای را به وجود آورده است. البته بتن نسبت به دیگر مصالح سازه‌ای از دیدگاه‌های گوناگون از جمله قابلیت کاهش هزینه تولید دارای مزیت است [۳]. طبق تحقیقی که توسط آقای ریسی بر روی ساختمان چهار طبقه با مقاومت فشاری ۲۰ و ۴۰ انجام شد نشان می‌داد که استفاده از بتن ۴۰ مگاپاسکال به‌جای ۲۰ مگاپاسکال هزینه اجرای ستون را ۱۸/۵درصد کاهش داد؛ اما هزینه اجرای سقف و ستون را ۴/۶ درصد افزایش داد و در مجموع هزینه اجرا اسکلت با بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال کمتر از بتن با مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال شد [۴]. باتوجه به بررسی مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان چنین بیان کرد که ضرورت استفاده بهینه از سیمان در تولید بتن و افزایش مقاومت و دوام آن از اهمیت خاصی در خصوص کاهش آلودگی محیط‌زیست و مصرف بهینه انرژی برخوردار می‌باشد. چرا که در فرایند تولید هر تن سیمان، حدوداً یک تن گاز کربن‌دار وارد محیط‌زیست گردیده و بیش از ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی (مازوت و یا گاز طبیعی) در کنار ۱۱۰ کیلووات‌ساعت برق مصرف می‌شود. از طرف دیگر درصورتی‌که بتن بادوام و مقاومت پایین تولید گردد، مجبور به تخریب و مصرف مجدد سیمان خواهیم بود؛ لذا به‌نظر می‌رسد دانستن اصولی که باعث افزایش مقاومت و دوام بتن گردد، می‌تواند در راستای توسعه پایدار مفید باشد [۵]. منظور از طرح اختلاط بتن با مقاومت و عملکرد بالا تعیین نسبت اختلاط بین اجزاء بتن جهت کسب خواص مشخص در بتن تازه و سخت شده (کارایی لازم، مقاومت فشاری موردنظر و دوام کافی) می‌باشد. امروزه آیین‌نامه‌های متعددی برای طرح مخلوط بتن معمولی وجود دارد، لکن هنوز طرح اختلاط جامعی جهت بتن‌های با مقاومت بالا تدوین نشده است. یکی از آیین‌نامه‌هایی که به‌صورت جزئی به طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا اشاره می‌نماید، آیین‌نامه بتن امریکا[2] می‌باشد. از جمله انتقاداتی که می‌توان به طرح آیین‌نامه مذکور وارد نمود، عدم دخالت خواص مکانیکی درشت‌دانه در تعیین طرح اختلاط بتن به‌منظور کسب مقاومت فشاری موردنظر می‌باشد. تحقیقات گسترده محققین نشان می‌دهد که خواص مکانیکی درشت‌دانه سهم بسزایی در شکل‌گیری خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا ایفا می‌نماید [۶]. هدف ما از پژوهش حاضر بررسی اختلاط با مقاومت بالا باهدف دستیابی به مقاومت فشاری بهینه توسط روش بهینه‌سازی می‌باشد.

۲- بتن با مقاومت بالا

یکی از اصول مهم در ایمن‌سازی سازه‌های بتن مسلح در مناطق زلزله‌خیز شکل‌پذیر بودن آن‌هاست. امروزه اجرای بتن‌های با مقاومت بالا در اکثر کشورها از جمله ایران رایج گردیده است. بر اساس سند جامع چشم‌انداز بتن ارائه شده از سوی مرکز تحقیقات مسکن و شهرسازی ایران، نیاز است تا بتن‌هایی با مقاومت بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال تا سال ۱۴۰۴ تولید شده و در پروژه‌های اجرایی کشور به‌کار گرفته شوند [۷].

طی اواخر دهه گذشته رسیدن به مقاومت فشاری بالا در بتن از اهداف اصلی مهندسان کارهای بتنی بوده است. با اینکه بتن با مقاومت بالا به‌عنوان مصالح جدیدی به‌حساب می‌آید، اما از سالیان دور تا به امروز سیر تکامل آن بارها تغییر کرده است. بتنی با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال در دهه ۱۹۵۰ میلادی بتن با مقاومت بالا تلقی می‌شد، در دهه ۱۹۶۰ بتنی که مقاومت آن ۴۱ تا ۵۲ مگاپاسکال بود، بتن با

[1] HSC: High Strength Concrete
[2] ACI: American Concrete Institute

مقاومت بالا به‌حساب می‌آمد، بتن‌هایی با مقاومت فشاری ۶۲ مگاپاسکال در اوایل دهه ۱۹۷۰ ساخته شدند، امروزه بتن‌هایی با مقاومت ۱۴۰ مگاپاسکال مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸].

به‌طورکلی ساخت بتنی با مقاومت فشاری در حدود ۵۰ مگاپاسکال با کاهش نسبت آب به سیمان تا حد ۰,۳ امکان‌پذیر است. ساخت بتنی با مقاومت زیاد و در حد ۱۲۰ مگاپاسکال و استفاده از آن در ساخت سازه‌های مختلف به ویژه ساختمان‌های بلند، در کشورهای پیشرفته دنیا رواج یافته است. از جمله مزایای این بتن‌ها می‌توان به مقاومت فشاری و مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته بیشتر و نفوذپذیری کمتر آن‌ها اشاره کرد. از عوامل موثر در رسیدن به چنین مقاومت‌های بالا در بتن، استفاده از شن و ماسه مقاوم و با شکل مناسب، افزایش مقدار سیمان مصرفی، محدود کردن اندازه بزرگترین سنگدانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت ماسه به سیمان مناسب برای همگنی بیشتر آن می‌باشد. همچنین با استفاده از مواد بسیار ریزدانه و با اندازه‌هایی کمتر از دهم میکرون مانند دوده سیلیس می‌توان مجموعه‌ای متراکم‌تر و با تخلخل بسیار کم را تهیه نمود [۹].

در بتن‌های با مقاومت بالا بایستی تاحدامکان نسبت آب به سیمان را کاهش داد (W/C=0.18~0.35) که در این حالت بعضی دانه‌های سیمان هیدراته نشده و به‌صورت مواد ریزدانه پرکننده، دانسیته را افزایش داده و در نتیجه سبب افزایش مقاومت می‌شوند. برای تأمین روانی و کارایی کافی در چنین مخلوط‌هایی که با آب بسیار اندک تهیه می‌شوند، لازم است از فوق روان‌کننده‌ها استفاده شود. در مورد میزان نرمی بتن‌های با مقاومت بالا باید اشاره شود که غالباً با افزایش مقاومت بتن، تردی و شکنندگی آن نیز افزایش می‌یابد. برای افزایش نرمی این بتن‌ها می‌توان به آن‌ها الیاف کوتاه اضافه نمود [۱۰]. این الیاف می‌توانند الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل الکل، کربن، نایلون باشند [۱۱].

باتوجه‌به آنچه که گفته شد از جمله موارد بااهمیت در رابطه با کاربرد بتن با مقاومت بالا در سازه‌ها، توجه دقیق به طرح اختلاط، نحوه اجرا و عمل‌آوری آن است. در رابطه با طرح اختلاط باید گفته شود که به‌دلیل کثرت پارامترهای تأثیرگذار در خواص بتن‌های با مقاومت بالا تاکنون روش طرح اختلاط مشخصی در آیین‌نامه‌های معتبر برای این نوع بتن‌ها پیشنهاد نشده است؛ بنابراین لازم است در کاربردهای عملی از بتن با مقاومت بالا بر حسب نیاز، طرح اختلاط مناسب با مطالعات آزمایشگاهی و روش سعی و خطا و یا هر روش معتبر دیگری تعیین شود [۱۲]. عامل مهم دیگر درباره بتن‌های با مقاومت بالا این است که برخی مواقع مصرف سیمان در آن‌ها خیلی افزایش‌یافته و ممکن است به بیش از Kg/m^3 ۵۰۰ هم برسد. این موضوع علاوه بر افزایش قیمت تمام شده آن، باعث می‌شود به‌دلیل ازدیاد حرارت و جمع‌شدگی در بتن، ترک‌هایی در آن ایجاد شود [۱۳]. در جدول زیر مشخصات یک نمونه از بتن‌های با مقاومت بالا که در سال‌های اخیر ساخت سازه‌های بلند به‌کار رفته است، نشان‌داده شده است.

جدول ۱- مشخصات یک نمونه از بتن‌های با مقاومت بالا

طرح اختلاط		**خواص بتن**	
نسبت آب به سیمان	۰,۲۵	اسلامپ	۲۵۰ میلیمتر
آب	۱۳۵ لیتر	درصد هوا	۴,۴ درصد
سیمان نوع ۱ (مکعب)	۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	مقاومت فشاری ۷ روزه	۷۷ مگاپاسکال
دوده سیلیس (مکعب)	۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	۹۲,۳ مگاپاسکال
شن تا ۱۰ میلیمتر (مکعب)	۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	مقاومت فشاری ۹۰ روزه	۱۰۶ مگاپاسکال
ماسه طبیعی (مکعب)	۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	مقاومت فشاری یک‌ساله	۱۱۹,۴ مگاپاسکال
دیرگیرکننده	۱,۸ لیتر بر مترمکعب		
فوق روان‌کننده	۱۴ لیتر بر مترمکعب		

عوامل و فاکتورهای مهم در ساخت بتن با مقاومت بالا:

۱- کاهش نسبت آب به سیمان

۲- استفاده از سنگ‌دانه‌های مناسب

۳- استفاده از حداکثر میزان مصالح سنگی

۴- تراکم مناسب بتن

۵- استفاده از سیمان‌های مقاوم در برابر حمله سولفات‌ها

۶- استفاده از پوزولان‌های مناسب

۷- سایر مواد افزودنی(عفتی و همکاران، ۱۳۹۴)

۳- خواص بتن با مقاومت بالا و موارد کاربرد آن

از دیدگاه مهندسان، مقاومت فشاری از ویژگی‌های مکانیکی بتن به‌شمار می‌آید. مقاومت فشاری بتن ازجمله مهم‌ترین معیار کیفیت آن باشد. برخی عوامل بسیار مهم بر مقاومت فشاری بتن عبارت‌اند از نسبت آب به سیمان، مقدار و نوع سیمان مصرفی، میزان ریزدانه و درشت‌دانه، نوع و میزان فوق‌روان‌کننده، و سن نمونه بتنی [۱۴]. غالباً رشد مقاومت بتن با مقاومت بالا در سنین اولیه نسبت به بتن معمولی بیشتر است، ولی افزایش مقاومت در طول زمان، تابع مواد تشکیل‌دهنده و روش‌های عمل‌آوری بتن می‌باشد. نکته قابل‌توجه در عمل‌آوری بتن با مقاومت زیاد، تأمین رطوبت و دمای کافی است تا در طول دوره عمل‌آوری، آبگیری سیمان تداوم داشته باشد [۵].

همچنین مقاومت کششی بتن از دیگر خصوصیات مکانیکی آن می‌باشد. به‌طور معمول مقاومت کششی بتن حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است، بیشتر عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری بر روی مقاومت کششی نیز تأثیرگذار بوده و مقاومت کششی بتن با مقاومت بالا به‌مراتب بیشتر از بتن معمولی می‌باشد. اما باید در نظر داشت مقاومت کششی ربطی به نوع سنگ‌دانه ندارد به‌عنوان مثال می‌توان با سنگ‌دانه‌های کوارتزی مقاومت فشاری بتن را ۲۰ درصد افزایش داد [۱]. از آن‌جاکه مقاومت بتن تا حد زیادی به میزان تراکم آن بستگی دارد، لازم است میزان روانی مخلوط به حدی باشد که امکان دستیابی به یک تراکم مناسب را فراهم سازد. با افزودن فوق‌روان‌کننده، میکروسیلیس و نظایر آن به‌مقدار مناسب در مخلوط بتن می‌توان کارایی موردنظر را تأمین کرد. منحنی تنش-کرنش و ضریب ارتجاعی بتن از دیگر ویژگی‌های مکانیکی بتن می‌باشد. شکل منحنی تنش-کرنش بتن با مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی، خطی‌تر و دارای شیبی بیشتر می‌باشد [۱۵].

مقدار کرنش در حداکثر تنش ممکن است بیشتر از مقدار مشابه در بتن معمولی باشد. با این‌حال کرنش نهایی در بتن بامقاومت‌بالا نسبت به بتن معمولی کمتر است. به بیانی دیگر، بتن بامقاومت‌بالا تردتر از بتن معمولی می‌باشد. برای رفع این کمبود و افزایش میزان نرمی بتن بامقاومت‌بالا می‌توان به آن الیاف کوتاه اضافه نمود. ضریب ارتجاعی یا همان شیب منحنی تنش-کرنش برای بتن بامقاومت‌بالا در مقایسه با بتن معمولی دارای مقادیر بالاتری است یعنی بتن بامقاومت‌بالا، علاوه بر اینکه می‌تواند تنش بسیار بالاتری را نسبت به بتن معمولی تحمل کند، در یک تنش یکسان، کرنشی به‌مراتب کمتر از بتن‌های معمولی از خود نشان می‌دهد. وزن مخصوص بتن از دیگر مشخصه‌های آن است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که وزن مخصوص بتن‌های بامقاومت‌بالا، اندکی بیشتر از بتن‌های معمولی ساخته شده از همان مصالح می‌باشد. بااین‌حال وزن سازه‌های ساخته شده با بتن بامقاومت‌بالا در مقایسه با بتن‌های معمولی به‌مراتب سبک‌تر بوده که این نکته یکی از مزیت‌های استفاده از بتن بامقاومت‌بالا، به‌خصوص در مناطق زلزله‌خیز به‌حساب می‌آید. در ضمن پدیده خزش، نفوذناپذیری و سایش در بتن‌های بامقاومت‌بالا نسبت به بتن‌های معمولی کمتر و دوام و مقاومت برشی، بیشتر می‌باشد [۱۶]. دامنه کاربرد بتن‌های بامقاومت‌بالا، خیلی وسیع نیست. امروزه استفاده اصلی از بتن بامقاومت‌بالا در ساختمان‌های بلندمرتبه، پل‌های پیش‌تنیده و ساخت بعضی سازه‌های خاص می‌باشد. اگر چه در ساخت قسمت‌های مختلف ساختمان‌های بلند ممکن است از بتن بامقاومت‌بالا استفاده شود، ولی کاربرد اصلی این بتن در ساخت ستون‌های این نوع ساختمان‌ها می‌باشد. با انجام چنین کاری ابعاد ستون‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش‌یافته و امکان افزایش تعداد طبقات یک ساختمان فراهم می‌آید. در ساخت پل‌ها نیز از بتن بامقاومت‌بالا به‌طور روزافزون استفاده می‌شود. مقاومت کششی بتن با ازدیاد مقاومت فشاری آن افزایش‌یافته و این امر در طراحی اعضای بتنی پیش‌تنیده نظیر شاه‌تیرها (که در آن مقاومت کششی بتن کنترل‌کننده است) دارای ارزش زیادی می‌باشد. همچنین کاهش خزش در این نوع بتن، برای کاهش اتلاف پیش تنیدگی شاه‌تیرهای پل مفید است [۱۷]. بتن

لایه محافظ خوبی در برابر تابش‌های هسته‌ای نوترون و گاما است، با استناد به این موضوع که استفاده از بتن بامقاومت‌بالا به‌جای بتن معمولی باعث کاهش ضخامت خواهد شد، باتوجه به حجم زیاد بتن‌ریزی در نیروگاه اتمی، می‌توان در هزینه ساخت صرفه‌جویی کرد [۱۸]. همچنین استفاده از این بتن موجب کاهش ابعاد ستون و تیر می‌شود که در نتیجه کاهش هزینه و استفاده مناسب‌تر از فضاها را شامل می‌شود [۴].

۴- بررسی طرح اختلاط

به تعیین میزان ترکیب اجزای بتن با استناد به اهداف موردنظر مانند دوام، پیوستگی و مقاومت طرح اختلاط بتن می‌گویند [۱۸]. ابتدا باید طرح اختلاطی با استفاده از مصالحی که عموماً در کارگاه‌ها موجود است، ارائه شود. به‌همین منظور در طرح اختلاط به‌دست‌آمده برای ساخت بتن‌های با مقاومت بالا از آب آشامیدنی، سیمان تیپ یک، ماسه طبیعی و شن شکسته با حداکثر قطر ۲۰ میلیمتر استفاده شده است. به‌علاوه پودر سنگ به‌عنوان فیلر عمومی و میکروسیلیس به‌عنوان فیلر کمکی مورد استفاده قرار گرفتند. برای روان کردن، فوق‌روان‌کننده‌ای با کارایی عالی بر پایه پلی‌کربوکسلیک-اتر با نام تجاری Glenium 110P مورد استفاده قرار گرفت. برای به‌دست‌آوردن طرح اختلاط مناسب بیش از ۶۰ آزمایش انجام شده که در نهایت چهار نوع طرح اختلاط به شرح جدول شماره ۱ به‌دست آمد. وزن‌های بیان شده در این جدول بر حسب کیلوگرم بوده و برای ساخت یک مترمکعب بتن‌های بامقاومت‌بالا ارائه شده‌اند.

جدول ۲- طرح اختلاط بتن بامقاومت‌بالا

شماره طرح اختلاط	نسبت آب به سیمان	درصد میکروسیلیس (نسبت به وزن سیمان)	وزن سیمان (kg)	وزن آب (kg)	پودر سنگ (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)
۱	۰/۳۵	۰	۵۰۰	۱۷۵	۱۵۵	۸۶۷	۶۶۸
۲	۰/۳۵	۱۰	۴۵۰	۱۷۵	۱۵۵	۸۶۷	۶۶۸
۳	۰/۴۵	۰	۴۰۰	۱۸۰	۱۵۰	۸۳۳	۷۲۲
٤	۰/۴۵	۱۰	۳۶۰	۱۸۰	۱۵۰	۸۳۳	۷۲۲

۵- آزمایش‌ها

همان‌طورکه بیان شد بتن‌های بامقاومت‌بالا دارای پنج آزمایش اساسی می‌باشد که آزمایشات جریان اسلامپ، حلقه J و قیف V شکل، ساده بوده و در محیط کارگاه به‌راحتی قابل‌اجرا هستند. اما آزمایش l-BOX و آزمایش U-BOX با مشکل همراه بوده و نیاز به تهیه دستگاه‌های خاص دارند. محدوده خواص اندازه‌گیری شده بتن‌های بامقاومت‌بالا در این تحقیق عبارت‌اند از:

$2123/33 \le Y_{(concrete)} \le 2628/33 kg/m^3$ — $Y_{(average)} = 2536/10 kg/m^3$.

$0 \le Slump \le 22cm$ — $slump_{(average)} = 3/56 cm$.

$86/5 \le f_c(7) \le 686/5\ kg/cm^2$ — $f_c(7)_{(average)} = 446/56\ kg/cm^2$.

$122/5 \le f_c(28) \le 783/5\ kg/cm^2$ — $f_c(28)_{(average)} = 565/49\ kg/cm^2$.

$170 \le f_c(90) \le 907/5\ kg/cm^2$ — $f_c(90)_{(average)} = 614/85\ kg/cm^2$.

در انجام این مطالعه از چهار آزمایش به شرح زیر استفاده شد:

۵-۱- آزمایش جریان اسلامپ

این آزمایش به‌منظور تعیین توانایی‌های تغییر شکل بتن تحت اثر وزن خود بدون وجود هیچ قیدی به‌جز اصطکاک سطح جریان تعریف شده است. معیار اندازه‌گیری این آزمایش قطر بتن پهن شده می‌باشد. این قطر نشان‌دهنده تنش تسلیم بتن تازه و معیار سنجش قابلیت پرکنندگی بتن است.

۵-۲-آزمایش حلقه J

این آزمایش برای شبیه‌سازی عبور بتن تازه از آرماتور می‌باشد. اختلاف ارتفاع بتن در قبل و بعد از آرماتور نشان‌دهنده توانایی عبور بتن از آرماتور است. هر چه این اختلاف بیشتر باشد توانایی عبور بتن از بین آماتورها کمتر است.

۵-۳- آزمایش قیف V

در این آزمایش مدت‌زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد، اندازه‌گیری شده و به‌عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری و تعیین جداشدگی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۴-آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام این آزمایش نیاز به نمونه بتنی با ابعاد استاندارد داریم که طبق آیین‌نامه‌های مختلف نمونه می‌تواند استوانه‌ای و یا مکعبی باشند. در این آزمایش برای ساخت و عمل‌آوری نمونه از آیین‌نامه BS 1881:part 118-1983 استفاده کردیم. طبق این استاندارد برای آزمایش مقاومت فشاری نیاز به نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر داریم بعد از گذشت ۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز (که در این مدت نمونه در آب غوطه‌ور بود) با کمک جک هیدورلیکی مقاومت فشاری قابل تحمل نمونه محاسبه شد.

۶- مدل رگرسیونی

باتوجه به مطالعات گذشته و آزمایش‌های انجام شده، این نتیجه حاصل شد که تغییر در افزایش درصد فوق‌روان‌کننده، تأثیری در کاهش یا افزایش دیگر مصالح ندارد و تأثیر آن به‌طور مستقیم بر روی جواب آزمایش‌ها می‌باشد. حال باتوجه به طرح‌های اختلاط ارائه شده در جدول ۱، نمونه‌های بتنی با درصد فوق‌روان‌کننده ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶، نسبت به وزن سیمان ساخته شد وآزمایشات مربوط به بتن بامقاومت‌بالا بر روی آن‌ها صورت گرفت. در انجام آزمایش‌ها سعی شد تا از تمام خطاهایی که به نتیجه صدمه وارد می‌کند دوری شود، اما به‌هرحال خطاهای قهری در تمام کارهای آزمایشگاهی نتایج را تهدید می‌کند. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های بتن‌های با مقاومت بالا

شماره طرح اختلاط	درصد فوق روان‌کننده (نسبت به وزن سیمان)	جریان اسلمپ (mm)	حلقه J (mm)	قیف V (s)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۹۰روزه (MPa)
۱	۰/۴	۴۶۰	–	–	۴۴	۶۱	۶۵
	۰/۸	۷۳۰	۱۲	۶/۵	۴۰	۵۸	۶۳/۲
	۱/۲	۷۸۵	۶/۳	۵/۴	۳۹	۵۸	۶۲
	۱/۶	۸۲۵	۴	۴/۸	۳۵	۵۶	۶۰/۸
۲	۰/۴	۴۱۰	–	–	۴۶	۶۹	۷۲
	۰/۸	۵۵۰	۱۴/۵	۸	۴۲	۶۲	۶۷
	۱/۲	۶۷۰	۸	۶/۲	۴۰	۶۰	۶۵
	۱/۶	۷۸۰	۵/۵	۵/۳	۳۸	۵۸	۶۳
۳	۰/۴	۴۸۰	-	–	۳۲	۴۷	۵۲
	۰/۸	۷۳۰	۱۴	۴	۳۰	۴۲	۴۶/۵
	۱/۲	۸۱۰	۶/۵	۳/۶	۲۹	۴۱	۴۴/۵
	۱/۶	۸۳۰	۴/۲	۳/۳	۲۷	۳۷	۴۱/۲
۴	۰/۴	۴۳۰	–	–	۳۴	۴۸	۵۳
	۰/۸	۵۳۰	۱۷	۴/۸	۳۱	۴۵	۴۹
	۱/۲	۷۶۰	۱۲	۴/۲	۳۰	۴۶	۴۹/۲
	۱/۶	۷۷۰	۱۱	۳/۸	۲۸	۴۱	۴۵/۵

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با درصد فوق‌روان‌کننده ۰/۴، هر چند بتن روان ساخته شده، اما بتن به حد خودتراکمی نرسیده است. در ضمن جواب تمام آزمایش‌ها با افزایش درصد فوق‌روان‌کننده از ۰/۸ تا ۱/۶ تقریباً به‌صورت خطی تغییر می‌کنند. پس می‌توان با

رگرسیون، تابعی خط با تابعی درجه دو بین درصد فوق روان‌کننده، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶ به‌وجود آورد. توابع رگرسیونی آزمایش‌ها، در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ ارایه شده‌اند.

جدول ٤- توابع رگرسیونی برای طرح اختلاط شماره ۱ (نسبت آب به سیمان (۰/۳۵)، درصد میکروسیلیس (۰)، وزن سیمان (۵۰۰kg)، وزن آب (۱۷۵kg)، پودرسنگ (۱۵۵kg)، شن (۸٦۷kg)، ماسه (٦٦۸kg))

نام آزمایش	تابع	R^2
آزمایش جریان اسلامپ	Y=118.7(X)+ 637.5	۰/۹۹۱
آزمایش حلقه J	$Y=10.62(X^2)$-35.5(X)+33.6	۱
آزمایش قیف V	Y = -2,125(X)+ 8,116	۰/۹۷۲
مقاومت فشاری ۷روزه	Y=-6.25(X)+45.5	۰/۸۹۲
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	Y=-2.5(X)+60.33	۰/۷۵۰
مقاومت فشاری ۹۰ روزه	Y=-3(X)+65.6	۱

جدول ٥- توابع رگرسیونی برای طرح اختلاط شماره ۲ (نسبت آب به سیمان (۰/۳۵)، درصد میکرو سیلیس(۱۰)، وزن سیمان (٤٥۰kg)، وزن آب (۱۷۵kg)، پودرسنگ (۱۵۵kg)، شن (۸٦۷kg)، ماسه (٦٦۸kg))

نام آزمایش	تابع	R^2
آزمایش جریان اسلمپ	Y = 287.5(X) + 321.6	۰/۹۹۹
آزمایش حلقه J	$Y = 12.5(X^2)$-41.25X+39.5	۱
آزمایش قیف V	Y = -3.375(X) + 10.55	۰/۹٦٤
مقاومت فشاری ۷ روزه	Y=-5(X)+46	۱
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	Y=-5(X)+66	۱
مقاومت فشاری ۹۰ روزه	Y=-5(X)+71.23	۰/۹٦۰

جدول ٦- توابع رگرسیونی برای طرح اختلاط شماره ۳ (نسبت آب به سیمان (۰/٤٥)، درصد میکروسیلیس(۰)، وزن سیمان (٤۰۰kg)، وزن آب (۱۸۰kg)، پودرسنگ (۱۵۰kg)، شن (۸۳۳kg)، ماسه(۷۲۲kg))

نام آزمایش	تابع	R^2
آزمایش جریان اسلمپ	Y = 125(X)+640	۰/۸۹۲
آزمایش حلقه J	$Y = 16.25(X^2)$-51.25(X)+44.6	۱
آزمایش قیف V	Y =-0.875(X)+4.683	۰/۹۹۳
مقاومت فشاری ۷ روزه	Y = -3.75(X) +33.16	۰/۹٦٤
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	Y = -6.25(X)+47.16	۰/۹۸٦
مقاومت فشاری ۹۰ روزه	Y=-6.625(X)+51.85	۰/۹۹۸

جدول ۷- توابع رگرسیونی برای طرح اختلاط شماره ٤ (نسبت آب به سیمان (۰/٤٥)، درصد میکروسیلیس(۱۰)، وزن سیمان (۳٦۰kg)، وزن آب (۱۸۰kg)، پودرسنگ (۱۵۰kg)، شن (۸۳۳kg)، ماسه (۷۲۲kg))

نام آزمایش	تابع	R^2
آزمایش جریان اسلمپ	Y = 300(X) +326.6	۰/۷۸۱
آزمایش حلقه J	$Y = 12.5(X^2)$-37.5(X)+39	۱
آزمایش قیف V	Y=-1.25(X)+5.766	۰/۹۸٦
مقاومت فشاری ۷ روزه	Y = -3.75(X)+34.16	۰/۹٦٤
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	Y = -5(X)+50	۰/۵۷۱
مقاومت فشاری ۹۰ روزه	Y=-4.75(X)+53.6	۰/٦۵۲

۷- بهینه‌سازی اختلاط بتن

در بتن‌های ویژه اغلب باتوجه‌به استفاده از موادی خاص به‌منظور ایجاد خواص ویژه و از طرفی هزینه بالای اغلب این مواد، بهینه‌سازی اجزاء اصلی طرح اختلاط بتن می‌تواند سبب ذخیرهٔ منابع و نیز توجیه‌پذیری آن‌ها گردد [۱۹]. هدف از بهینه‌سازی یافتن

مقادیر بهینه پارامترهای مهم طراحی (متغیرهای طراحی) برای حداقل (یا حداکثر) کردن یک کمیت (تابع هدف) تحت محدودیت‌های خاصی (قیود طراحی) می‌باشد. طراحی یک فرایند چرخه‌ای است. منظور از چرخه این است که قبل از این که یک طرح قابل‌قبول به‌دست آید سیستم‌های آزمایشی متعددی به‌دنبال هم تحلیل می‌شوند. جهت ارائهٔ یک مدل بهینه‌سازی مناسب و الگوریتم مؤثر برای طرح اختلاط بتن، لازم است که اجزای آن شامل متغیرهای طراحی، تابع هدف و قیود طراحی به‌صورت مناسب تعریف و رابطه‌سازی شوند. رابطه‌سازی یک مسئله طراحی بهینه، عبارت است از بیان مسئله به‌صورت یک عبارت ریاضی. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده بتن شامل آب، سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه هستند که با تغییر هر یک از آن‌ها، مشخصه‌های طرح از جمله مقاومت فشاری، می‌تواند به‌شدت دچار تغییر گردد. البته در برخی شرایط، مواد و افزودنی‌های دیگری نیز به این چهارعنصر اضافه می‌گردد. اما باتوجه‌به شرایط طبیعی اغلب کارگاه‌ها، در این تحقیق تنها عناصر اصلی مذکور لحاظ شده‌اند [۲۰].

۸- شبیه‌سازی و روش تحقیق

شبیه‌سازی و یافتن ترکیب بهینه برای اختلاط بتن بامقاومت‌بالا در این پژوهش توسط الگوریتم ازدحام ذرات[1] انجام شده است. استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات جهت بهینه‌سازی طرح اختلاط، مستلزم تعریف تابع هزینه‌ای است که توسط الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شود. بهینه‌سازی در این پژوهش بر اساس داده‌های آزمایش بوگاس و همکارانش[2] انجام شده و مقادیر بهینه برای بهترین طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا در این آزمایش یافته می‌شود.

تابع هدف برای این پژوهش جهت کاهش هزینه و همچنین سبک‌سازی بتن با مقاومت بالا تعریف شده است. روش کار در الگوریتم ازدحام ذرات بدین صورت است که برای هریک از پارامترهای تابع هدف، معمولاً محدوده‌ای تعیین می‌شود و در محدوده تعیین شده برای این پارامترها، تابع هدف تعریف شده بهینه می‌گردد؛ لذا باتوجه به آزمایش‌های بوگاس و همکارانش که مقادیر هر یک از مواد تشکیل‌دهنده بتن بامقاومت‌بالا طی ۱۸ آزمایش آورده شده است، مقادیر ماکزیمم و مینیمم هر پارامتر و ماده تشکیل‌دهنده بتن انتخاب شده، الگوریتم ازدحام ذرات جهت یافتن بهترین نسبت اختلاط اعمال شده است.

۹- بهینه‌سازی وزن بتن

تابع هزینه تعریف شده جهت، کمینه‌کردن وزن (سبک‌سازی) بتن با مقاومت بالا بدین صورت تعریف شده است:

$$y=(w1*cement)+(w2*(fly_ash))+(w3*Ms)+(w4*Mw)$$

لازم به‌ذکر است در تابع فوق w_1 تا w_4 وزن‌های هریک از پارامترها هستند که به‌طور پیش‌فرض یک در نظر گرفته شده‌اند، بدین معنی که اهمیت مواد تشکیل‌دهنده در وزن و هزینه، یکسان در نظر گرفته شده‌اند، و در صورت اهمیت بیشتر یکی از مواد تشکیل‌دهنده، طراح می‌تواند با افزایش وزن این پارامتر، میزان اهمیت مدنظر خود را اعمال نماید.

روند بهینه‌سازی در الگوریتم ازدحام ذرات برای کمینه‌کردن و سبک‌سازی وزن بتن بامقاومت‌بالا بدین صورت است که ابتدا برای هر یک از پارامترها و مواد تشکیل‌دهنده، جمعیتی تصادفی از جواب‌های ممکن تولید می‌شود و با قرارگرفتن در تابع هزینه، درصد معینی از بهترین جواب‌ها که تابع هزینه تعریف شده را کمینه می‌کنند به‌عنوان والدین انتخاب شده، در تکرار بعدی این والدین فرزندان خود را تولید می‌کنند که ویژگی در نظر گرفته شده برای فرزندان در این پژوهش، شباهت آن‌ها به والدینشان می‌باشد. روند مذکور تا حدی ادامه می‌یابد که یا تعداد تکرارهای تعریف شده برای الگوریتم به پایان رسد، یا اینکه معیار همگرایی (دقت) تعریف شده برای الگوریتم فراهم شود. لازم به‌ذکر است در این پژوهش به‌طور پیش‌فرض تعداد تکرارها ۱۰۰ و نیز معیار همگرایی (دقت) ۰,۰۰۱ تعریف شده است که در صورت پایان این ۱۰۰ تکرار یا تأمین‌شدن دقت ۰,۰۰۱ در جواب‌ها، اجرای الگوریتم متوقف خواهد شد. پس از اعمال الگوریتم ازدحام ذرات بر تابع هزینه تعریف شده، مقادیر بهینه هر یک از چهار پارامتر به‌صورت جدول زیر بدست آمد:

---

[1] PSO: Particle Swarm Optimization
[2] Bugas et al

جدول ۸- مقدار بهینه شده چهار پارامتر بعد از اجرای الگوریتم ازدحام ذرات

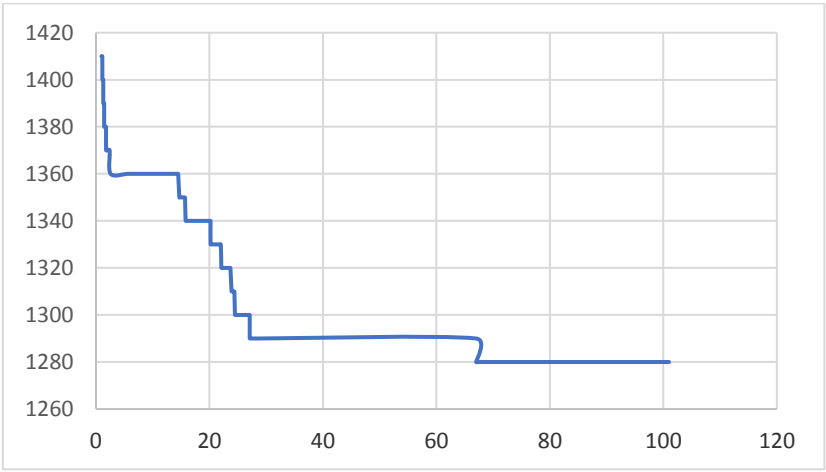
پارامتر	مقدار بهینه (kg/m^3)
Cement	۳۲۳,۶۷۳۱
Fly_Ash	۱۸۹,۳۱۰۵
Ms	۶۰۹,۵۴۱۴
Mw	۱۵۴,۰۲۶۱

لازم به‌ذکر است الگوریتم ازدحام ذرات در اجرای اول، پس از ۲۸ تکرار دقت موردنظر برای همگرایی را به‌دست داد. همچنین به‌دلیل تولید جمعیت اولیه تصادفی، همواره جواب‌های یکسانی به‌دست نخواهد داد، لذا با چندبار اجرای برنامه می‌توان به دیدی کلی از آن‌چه می‌تواند منجر به سبک‌سازی بتن بامقاومت‌بالا شود، دست‌یافت. جدول زیر نتایج آزمایش برای پنج بار اجرای برنامه را نشان می‌دهد:

جدول ۹- مقدار بهینه بدست آمده توسط الگورتم ازدحام ذرات برای ٤پارامتر تعیین شده پس از پنج بار اجرا

دفعات اجرا/متغیر	Cement	Fly_Ash	Mw	Ms
۱	۳۲۵,۳۲۰۵	۱۷۱,۴۴۶۴	۱۷۴,۳۸۷۱	۶۲۶,۶۰۰۳
۲	۳۴۷,۷۱۱۹	۱۶۶,۸۴۰۲	۱۵۱,۶۸۵۷	۶۱۶,۴۵۵۴
۳	۳۳۶,۷۷۷۹	۱۷۱,۱۷۵۸	۱۵۴,۵۴۱۸	۶۱۹,۹۰۲۵
۴	۳۳۶,۰۷۹۵	۱۷۲,۶۴۰۵	۱۶۴,۸۳۴۴	۶۰۸,۰۳۹۳
۵	۳۳۱,۷۶۲۲	۱۷۶,۰۶۲۸	۱۵۶,۱۹۹۰	۶۱۳,۱۷۲۲

باتوجه‌به جدول فوق می‌توان گفت، مقدار بهینه برای سیمان، مقداری بین ۳۲۵ تا ۳۴۷ kg/m^3 می‌باشد. همچنین برای Fly_Ash مقدار بهینه برای سبک‌سازی، مقداری بین ۱۶۶ تا ۱۷۲ kg/m^3 می‌باشد. برای سایر پارامترها نیز از جدول فوق مقادیر بهینه قابل استخراج است. همچنین نکته قابل ذکر این است که، واضح و مبرهن است، تعداد تکرارهای الگوریتم ازدحام ذرات برای دستیابی به همگرایی تعریف شده در این پژوهش که دقت آن ۰,۰۰۱ در نظر گرفته شده است، متفاوت است. اما به‌طور تقریبی می‌توان گفت تعداد تکرارهای لازم برای دستیابی به همگرایی مد نظر ۲۸ تکرار می‌باشد. شکل زیر روند همگرایی تابع هزینه تعریف شده را نشان می‌دهد.



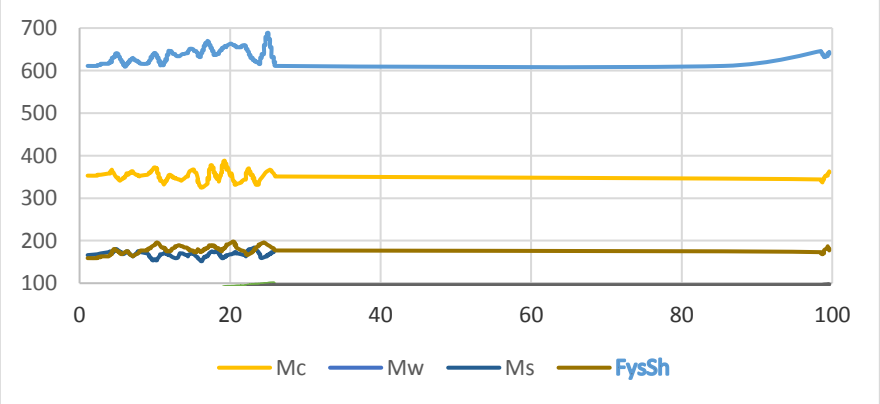
شکل ۱- نمودار نشان دهنده روند همگرایی تابع هزینه

۱۰- بهینه‌سازی از منظر هزینه

جهت بهینه‌سازی از منظر هزینه نیز با رعایت تمامی موارد مذکور در قسمت بهینه‌سازی از منظر سبک‌سازی می‌توان تابع هزینه‌ای به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$y=(w1*cement*C1)+(w2*(fly_ash)*C2)+(w3*Ms*C3)+(w4*Mw*C4)$$

که مقادیر C_1 تا C_4 را می‌توان هزینه هر ماده به‌ازای kg/m^3 در نظر گرفت. با داشتن مقادیر C_1 تا C_4 می‌توان بهینه‌ترین نسبت اختلاط را برای هر بتن با مقاومت بالا به‌دست آورد. به‌عنوان‌مثال برای قیمت‌هایی دلخواه نتیجه کلی به‌صورت زیر حاصل شد:



شکل ۲- نمودار ایجاد شده برای چهار پارامتر با قیمت‌های دلخواه

مقادیر بهینه به‌ازای تابع هزینه ارائه شده به‌صورت جدول زیر حاصل شد:

جدول ۱۰- مقدار بهینه به ازای تابع هزینه چهار پارامترتعیین شده

پارامتر	مقدار بهینه (kg/m^3)
Cement	۳۵۲,۴۵۲۷
Fly_Ash	۱۶۴,۹۳۲۱
Mw	۱۵۸,۳۵۷۰
Ms	۶۰۹,۹۰۴۲

ملاحظه می‌شود مقادیر پارامترها در این حالت نیز نزدیک به مقادیر پارامترها در حالت قبل است. لازم به ذکر است با تغییر وزن‌ها یا قیمت‌ها مقادیر فوق دچار تغییرات نسبتاً زیادی خواهند شد که باتوجه به ماهیت مسئله، و ماهیت روش کار الگوریتم ازدحام ذرات امری بدیهی است.

۱۱- نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین عوامل طراحی سازه می‌توان به‌صرفه اقتصادی اشاره کرد. با عنایت به این موضوع که کشور ما باید تا سال ۱۴۰۴ به مقاومت بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال برسد و این مهم بدون در نظر گرفتن صرفه اقتصادی میسر نخواهد بود. در این پژوهش سعی شد که بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا مورد بررسی قرار گیرد که در آن متغیر طراحی شامل مقادیر وزنی پارامترهای آب، سیمان، درشت دانه و ریزدانه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهند که می‌توان مقاومت لازم را با افزایش درشت دانه تا سقف حداکثر مجاز تغییر داد. که با توجه به نوع مقاومت خود مصالح و ضریب کم آن در تابع هدف این کار صرفه اقتصادی لازم را دارد. رابطه مقاومت فشاری برای نتایج شبیه‌سازی پیچیده‌تر از تئوری است و می‌توان نتیجه گرفت که رابطه خطی بین اجزا برای تأمین مقاومت در عمل باقی نمی‌ماند و رفتار بتن در شبیه‌سازی متفاوت است.

۱۱- مراجع

۱- محمدی گلستان، ح. و غفوری، م. (۱۴۰۱). بررسی اثر مینرالوژی و خصوصیات فیزیکومکانیکی سنگ منبع بر مقاومت فشاری بتن.

۲- کومار، مهتا. (۱۳۸۵). ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)، رمضان‌پور، علی‌اکبر، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۳۰ تا ۴۵.

3-ACI Standard 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1,1996.

۴- محمدی، م و ولدی، ا. (۱۴۰۰). بررسی اثر افزایش مقاومت فشاری در بتن های با مقاومت بالا بر هزینه مصالح مصرفی سازه های بتنی قاب خمشی با شکل پذیری ویژه بر روی خاک تیپ ۳. پنجمین کنفرانس بین المللی مطالعات جهانی در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران، ایران.

۵- موسوی، ح. (۱۳۹۰). عوامل موثر بر مقاومت فشاری و دوام بتن، ماهنامه تخصصی فن آوری سیمان، شماره ۲۹.

6-Bazant, Z.P., Xiang, Y., (1997). Size effect in compression fracture: splitting crack band propagation, J.Eng. Mech ASCE 123(2), 162-172.

۷- عفتی، ح.، کاهانی میری، م. و سجادی عطار، م. (۱۳۹۴). بررسی طرح اختلاط بهینه بتن اقتصادی با رویکرد دستیابی به مقاومت بالا، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران.

۸- رنجبریامچی، ح. و یوسفی میابی، م. (۱۴۰۰). آنالیز اقتصادی کاربرد بتن با مقاومت بالا در ساختمان های بتنی،کنفرانس ملی معماری، عمران، شهرسازی و افق‌های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، تبریز، ایران.

۹- توکلی زاده، م. ر.، میرنامی، ع. ا. و گلچین، م. (۱۳۸۸). بررسی تأثیر شکل و اندازه و اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، هشتمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، ایران، اردیبهشت‌ماه.

۱۰-وثوقی، ع. ر.، حاجیانی بوشهریان، ع. ر.، ناظمی، ر. و فاطمی، ه. (۱۳۹۰). ارزیابی کیفیت ماسه مورد استفاده در ساخت بتن و ارائه راه حل مناسب جهت بهبود خواص ماسه با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی)، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.

۱۱-حفیظی، ا. ح.، سلجوقیان، ع. ر.، و مستوفی نژاد، د.(۱۴۰۲). بررسی مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده با الیاف (UHPFRC)، سیزدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، ایران.

۱۲-مقصودی، ع. ا.، استقامتی، ع. ذ.، (۱۳۸۱). تحلیل و طراحی ستون‌های جعبه‌ای دارای بتن بامقاومت‌بالا (HSC) و رسم نمودارهای تداخلی، اولین کنفرانس ایمن سازی و بهسازی سازه‌ها.

13-Fasching, C.j. "Effect of High-Strengh Concrete (HSC) on Flexural Members," High Strengh Concrete (HSC) in Seismic Regions, ACI International, SP.176, 1999.

۱۴-روشن, ن. قلعه نویی, م. و خسروی, ا. ا. (۱۳۹۹). پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن با استفاده از الگوریتم‌های رگرسیونی یادگیری ماشین، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، ایران.

۱۵-کالوندی، م. رئیسی، ا. و جان‌محمدی، ک. (۱۳۸۴). طراحی محدوده منحنی دانه‌بندی مصالح برای طرح اختلاط بتن بامقاومت‌بالا، دوازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران.

16-Bing, L. Park, R. and Tanaka, H. "Stress-Strain Behavior of High-Strengh Concrete Confined by Ultra-Highand Normal-Strengh Transverse Reinforcements," ACI Structural Journal, V.98, No. 3, PP. 395-404, MayJune 2001.

17-Newman, J.,Choo, B.S., (2005), "Advanced Concrete Technology 1: Constituent Materials," ButterworthHeinemann, 224pp.

۱۸-حبیبی، ع. ر.، رحمانی، ی. و سعیدپور، س. (۱۳۹۷). بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین بر اساس نتایج آزمایشگاهی. مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)، ۱۸(۶)، ۶۳-۷۲.

19-T.M. Murali, S. Kandasamy, "Mix Proportioning of High Performance Self-Compacting Concrete Using Response Surface Methodology," The Open Civil Engineering Journal, 3, 93-97. 2009.

20-A.Ghezal, and K. H. Khayat, "Optimizing Self- Consolidating Concrete with Limestone Filler by Using Statistical Factorial Design Methods," Materials Journal. 99, 3, 264-272, 2009.