مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیستم، شماره ۳، سال۱۳۹۹

# بهینه سازی طرح مخلوط بتن خودتراکم الیافی حاوی پلی پروپلین با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری جستجوی کلاغ و ژنتیک

**محمدجواد طاهری امیری*[۱]، علی اشرفیان[۲]، جواد برنجیان[۳] ، فاطمه اصغری تیلکی[۲]**

۱. استادیار، موسسه آموزش عالی پردیسان، فریدونکنار، ایران*
۲. کارشناس ارشد مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی طبری بابل، بابل، ایران
۳. استادیار مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی طبری بابل، بابل، ایران

**Jvd.taheri@heip.ac.ir**

**تاریخ دریافت:۹۸/۱۰/۲ تاریخ پذیرش:۹۹/۳/۲۱**

## چکیده

این مطالعه به تحقیق در ارتباط با طرحی بهینه بتن خودتراکم الیافی حاوی پلی پروپیلن برای ساخت در صنعت ساختمان می پردازد. بتن ماده ای ترکیبی است که از مواد سیمانی ، آب، سنگدانه و مواد افزودنی تشکیل شده است که مجموعه این مواد عناصر اصلی تشکیل دهنده بتن می باشند. با توسعه استفاده از این مواد در مهندسی ساخت وسازمخلوطهای بتنی بیشترین موارد استفاده را در صنعت ساخت و ساز در سرتاسر دنیا داشته است. مقاومت فشاری معم ترین مشخصه در بتن می باشد. با این حال نقایصی در بتن مانند ترک در بتن، چغرمگی پایین و مقاومت کششی وجود داشته که نیاز به تقویت بتن در برابر این عیب را برجسته کرده است. در سالیان اخیر استفاده از بتن محتوی الیاف بعنوان یک مادهی ساختمانی مهم و با خواص مکانیکی مناسب جهت ساخت و ساز انواع سازهها استفاده میشود. هدف اصلی در این تحقیق، طراحی بتن توانمند خودتراکم الیافی با استفاده از الگوریتمهای فرا ابتکاری با پیاده سازی در نرم افزار متلب می باشد. برای بهینه سازی مبتنی بر راهکارهای فرا ابتکاری، الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) و الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان راهکارپردازشی محاسباتی توسعه داده داده شده است. برای این منظور، ٦٧ طرح اختلاط بتن خودتراکم الیافی شامل آب (۱۳۷/۲ – ۱۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب)، سیمان (۳۲۵/۵ – ۵۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، درشت دانه (۷۲۲ – ۹۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، ریزدانه (۸۰٤/۹ – ۹٦۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، نانوسیلیس (۰ – ٤۹/٦ کیلوگرم بر مترمکعب)، درصد حجمی الیاف (۰ – ۰/۹ درصد)، پودرسنگ آهک (۰ – ۲۸۸/۹ کیلوگرم بر مترمکعب) و فوق روان کننده (۱/۷۵ – ۱۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب) برای طراحی مخلوط بهینه مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه برای فرموله شدن مسئله بهینه سازی، تابع هدف مقاومت فشاری بتن برپایه روش رگرسیون چندگانه خطی توسعه داده شد. همچنین قیدهای بررسی شده در این مطالعه نسبت مقادیر طرح اختلاط و حجم مطلق مقادیر طرح اختلاط برای طراحی مخلوطی با مقاومت بهینه و مقرون به صرفه به عنوان محدودیت های تکنولوژیکی از فاکتورهای آزمایشگاهی تولید بتن مورد توجه قرار گرفته است. پیاده سازی الگوریتمیک روشهای فرا ابتکاری در محدوده ۳۰ – ۸۸/۷ مگاپاسکال تا رسیدن به مخلوط با مقادیر بهینه ادامه پیدا کرده و در نهایت ۵ نمونه از مخلوط بهینه توسعه داده شده با استفاده از الگوریتمهای CSA و GA جهت بررسی قابلیت و بهره وری الگوریتمها گزارش گردید. نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داده است که عملکرد الگوریتم CSA با محدوده خطای میانگین ۳/۳۸ – ۱٤/٤۹ درصد در مقایسه با الگوریتم GA

با محدوده خطای میانگین ۷/۹۵ – ۱۵/۵۲ نتایج قابل توجه در دقت و همگرایی جواب‌ها ارائه نموده است. از این همچنین، الگوریتم‌های مورد استفاده به عنوان ابزار قابل اطمینان در حل مسایل بهینه سازی در مسایل مهندسی بویژه تکنولوژی بتن قابل توجه می باشد.

**واژگان کلیدی**: بتن خودتراکم الیافی، پلی پروپیلن، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک،الگوریتم جستجوی کلاغ

## ۱.مقدمه

امروزه بتن خودتراکم به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح جهان و به عنوان ماده ساختمانی قرن بیست و یکم شناخته شده است. ساخت این ماده مرکب با استفاده از ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین مواد ساده از یک سو، انعطاف‌پذیری، خواص مقاومتی ودوام آن از سوی دیگر و نیز از موادی در ساخت آن که به پاکسازی و کاهش آلودگی محیط زیست کمک می‌نماید موجب آن شده است که بتن به عنوان مصالح ممتاز مطرح شود[1]. عیب اساسی بتن در عمل با مسلح کردن آن با استقرار آرماتورهای فولادی در جهت نیروهای کششی برطرف می‌گردد. شایان ذکر است که در موارد متعددی جهت این نیروهای کششی به طور دقیق معلوم نیست. همچنین با توجه به اینکه آرماتور بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع همگن و ایزوتروپ باشد صحیح نخواهد بود. [2-4].

در سالیان اخیر، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و پردازش‌های هوشمند در جهت ارزیابی مقادیر بهینه مصالح مورد استفاده در تولید بتن، مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است.سوبولف و امیرجانف (۲۰۱۰) کاربرد الگوریتم ژنتیک دربهبود الگوریتم‌های دیگر در حوزه تکنولوژی بتن را مورد بررسی بیشتر قرار دادند. برای این منظور ایشان از الگوریتم بسته-بندی متراکم استفاده کرده و بهینه‌سازی مقادیر را انجام دادند. برای بهبود الگوریتم و ارائه مدلی با دقت بهتر، الگوریتم ژنتیک ترکیب شده و این الگوریتم بهبود بخشیده شده در دانه‌بندی بتن آسفالتی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت و اهمیت یافتن ترکیب سنگدانه-ای و تراکم آنها در اولویت قرار دارد. از این رو الگوریتم هیبرید شده با ژنتیک، کیفیت و دقت مطلوبی در پیدا کردن جواب‌های بهینه داشته‌اند [5]. منگ و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای در ارتباط با بهینه‌سازی مصالح شرکت کننده در طرح مخلوط بتن فوق توانمند برای بدست آوردن مقاومت فشاری انجام دادند. برای این منظور از ۲۵ سری طرح مخلوط برای دستیابی به مقاومت فشاری ۱۲۵ مگاپاسکال تحت شرایط استاندارد و ۱۷۸–۱۶۸ مگاپاسکال تحت عمل آوری یک روزه تحت حرارتی استفاده گردید. نتایج این بررسی‌ها نشان داد یافتن نسبت حجمی چسباننده به ماسه در این مطالعه با مشکلاتی مواجه بوده است. در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری همه اجزای طرح مخلوط در نسبت و مقادیر بهینه بررسی و گزارش گردید[6]. بتن بازیافتی و ارزیابی طرح مخلوط اقتصادی آن مورد مطالعه توشیچ و همکاران (۲۰۱۶) قرار گرفت. آنها معیارهای ارزیابی اقتصادی برای این بتن را براساس معیار زیست محیطی هزینه چرخه عمر و شاخص‌های اقتصادی در نظر گرفتند. معیارهای ارزیابی شده با استفاده از مصالح مصرفی بازیافت شده در این بتن (شن و ماسه رودخانه‌ای) برای بدست آوردن حداقل هزینه و بیشترین کیفیت مقاومتی در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل انجام شده در این مطالعه نشان داد ابزار مورد استفاده شامل روش‌های بهینه‌ساز الگوریتمی وارزیابی‌های تحلیلی محیط زیستی به عنوان ابزار قابل اعتماد در علوم مهندسی مورد استفاده قرار گرفتند[7]. نیگدلی و همکاران (۲۰۱۵) روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی را برای بتن الیافی ستون‌های تحت بار دوطرفه ارزیابی نمودند. در این روش یک فرآیند رایانشی با تجزیه و تحلیل در مراحل مختلف انجام شد.در این مطالعه با رویکرد بهینه‌سازی در ابعاد ستون‌های تحت بار حاوی بتن و فولاد با هدف کاهش هزینه‌های مصرفی و ارتقا مقاومت ستون تحت خمش، کشش و فشارهای وارده انجام شد. نتایج این مطالعه در قالب مقادیر مختلف و ارزیابی‌های بهینه‌سازی ارائه شده است. در در آخر نتایج با گزارشی از نتایج آزمایشگاهی انجام شده در سال ۲۰۰۰ میلادی مقایسه گردید.اعتبارسنجی انجام شده نشان داد می-توان از روش‌های ریاضیاتی رگرسیونی برای پیدا کردن فضای جواب‌های بهینه استفاده نمود[8]. سان و همکاران (۲۰۱۹) تحقیقی برای معرفی مقادیر طرح مخلوط بهینه بتن حاوی دوده سیلیسی و خاکستر بادی براساس وزن و مقاومت با استفاده از

الگوریتم‌های فرا ابتکاری ارائه نموده و مدل‌های بررسی شده مقادیر منتخب را گزارش نمودند[9]. بوایندال و آرونچالام (۲۰۲۰) مطالعه ای در ارتباط با بهینه سازی مقادیر طرح مخلوط بتن مقاومت بالا با رویکرد بیشینه سازی مقاومت فشاری و کمینه کردن هزینه با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته و الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب انجام داده و نتایج مقادیر بهینه شده در بازه ۹۰-۲۰ مگاپاسکال ارائه شده است [10]. الیف و همکاران (۲۰۲۰) برای طراحی دیوارنگهدارنده بتن مسلح با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری در نرم افزار متلب به جهت کنترل، فاکتورهای ایمنی را بهینه سازی نمودند [11].

در این پژوهش از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و جستجوی کلاغ برای یافتن مقادیر بهینه طرح مخلوط مبتنی بر بیشینه سازی مقاومت فشاری ۲۸روزه بتن الیافی استفاده شده و ارزیابی از شرایط دو الگوریتم در شرایط یافتن جواب‌های بهینه ارائه گردید.

## ۲. روش شناسی

بهینه‌سازی فرآیندی است که برای بهتر کردن یک مسئله دنبال می‌شود. فکر، ایده و یا طرحی که به وسیله یک دانشمند یا یک مهندس مطرح می‌شود، طی روال بهینه‌سازی بهتر می‌شود. در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و اطلاعات به دست آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه-سازی، ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها در خصوص چگونگی راه حل مسائل مختلف به کار می‌رود. در این مطالعه از دو الگوریتم برای معرفی طرح مخلوط بهینه استفاده گردیده که به معرفی آنها پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از روش‌های ابتکاری در مسأله بهینه-سازی است که ریشه آن از قانون بقای اصلح[1] نشأت می‌گیرد و در واقع این الگوریتم، یک شبیه‌سازی مجازی از نظریه تکامل تدریجی داروین می‌باشد که می‌گوید: موجودات ضعیف‌تر از بین می‌روند و موجودات قویتر باقی می‌مانند. ایده محاسبه تکاملی در دهه ۱۹۶۰، توسط رچنبرگ، در کتابی با عنوان «استراتژی‌های تکامل» معرفی شد[12]. این الگوریتم، در هر تکرار محاسباتی (نسل) روی جمعیتی از کروموزوم‌ها عمل کرده و تغییرات تصادفی روی مجموعه کروموزوم‌ها، از طریق اعمال عملگرهای ژنتیکی (جهش و ترکیب) روی کروموزوم‌ها انجام می‌دهد. الگوریتم ژنتیک، در واقع مدلی آماری از نحوه تکامل و توارث موجودات زنده می‌باشد و جزء دسته الگوریتم-های گشتن اتفاقی[2] در الگوریتم‌های بهینه‌سازی به حساب می-آید، با این تفاوت که به جای اینکه یک نقطه از فضای مطالعه مأمور گشتن در فضا باشد، یک جمعیت از نقاط انتخاب شده و با روابط توارثی و رقابتی تغییر داده می‌شود و به دنبال نقطه بهینه در جمعیت نسل‌های مختلف گشته و بدین‌سان احتمال رسیدن به نقطه مینیمم افزایش پیدا می‌کند [13-15].

### ۲-۲- الگوریتم جستجوی کلاغ

برای حل مسائل طراحی از روش‌های سنتی جستجوی پاسخ استفاده شده است. با وجود اینکه این روش‌ها در بسیاری از مسائل واقعی، پاسخ‌های نویدبخشی را بدست می‌دهند، اما ممکن است در یافتن پاسخ مسائلی با پیچیدگی بیشتر، دچار خطا شده و کاربرد آن‌ها با شکست مواجه گردد. در مسائل طراحی حقیقی، ممکن است که تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری بسیار زیاد بوده و در نظر گرفتن تأثیر آن‌ها بر تابع هدف بسیار پیچیده گردد [16]. در این مسائل، تابع هدف می‌تواند چندین نقطه بهینه محلی داشته باشد، اما همواره طراحان به دنبال پاسخ‌های بهینه سراسری هستند. نمی‌توان چنین مشکلاتی را با استفاده از روش‌های سنتی مرسوم که تنها نقاط بهینه محلی را می‌یابند، برطرف نمود. در این موارد نیاز است که از روش‌های بهینه‌سازی کارا و مؤثر استفاده گردد. یک روش فرا ابتکاری نوین ارائه شده در سالیان اخیر الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA[3]) بوده که در سال ۲۰۱۶ بوسیله اصغرزاده معرفی

1. Survival of the Fittest
2. Random Search

گردید [17]. این روش مبتنی بر رفتار هوشمندانه کلاغ‌ها بوده و در راستای حل مسائل بهینه‌سازی توسعه داده شده است. الگوریتم CSA یک روش مبتنی بر جمعیت است و ایده اصلی شکل‌گیری این روش از این نظریه که کلاغ‌ها مواد غذایی اضافی خود را در مخفیگاه‌هایی پنهان کرده و هنگامی که به آن مواد غذایی نیاز دارند، آن‌ها را مجدداً یافته و مصرف می‌کنند، الهام گرفته شده است. با توجه به رفتارهای هوشمندانه فوق‌الذکر، یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت، یعنی CSA توسعه داده می‌شود. اصول CSA به قرار زیر هستند:

- کلاغ‌ها به شکل گروهی زندگی می‌کنند.
- کلاغ‌ها موقعیت مکانی مخفیگاه‌های مواد غذایی خود را به خاطر می‌سپارند.
- کلاغ‌ها به منظور سرقت، یکدیگر را تعقیب می‌کنند.
- کلاغ‌ها از ذخایر خود، در مقابل احتمال به سرقت رفتن آن‌ها، محافظت می‌کنند.

## ۳. بحث و نتایج

مصالح مورد استفاده در ساختار بتن دارای هزینه‌های یکسانی نبوده و می‌بایست مقادیر آنها با رعایت شرایط مورد نیاز هر پروژه بهینه گردد. به عنوان مثال برای کاهش مصرف سیمان می‌توان به انتخاب دانه‌بندی مناسب و بهینه کردن طرح مخلوط بدون اضافه کردن مواد افزودنی اشاره کرد. دستیابی به بتن با مقاومت بالا در عین کاهش هزینه تمام شده و قابل استفاده بودن برای مصرف‌کنندگان دارای اهمیت زیادی بوده چرا که هزینه خرید مصالح از جمله بتن یکی از پارامترهای مهم اثرگذار بر هزینه ساخت سازه‌های بتنی بوده و می‌تواند یکی از مهمترین دلایل توسعه و رواج بتن‌های ویژه باشد. از این رو، بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن الیافی نقش ویژه‌ای در استفاده و کاربرد آن نیز خواهد داشت. در این فصل به بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن الیافی بر اساس نتایج آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- معرفی طرح مخلوط بتن‌های الیافی

در این پژوهش، ٦٧ مجموعه از طرح‌های مخلوط بتن الیافی که در آزمایشگاه بدست آمده، مورد استفاده قرار گرفته است. به جهت ارائه تحلیل های دقیق و یکپارچگی داده‌های جمع آوری شده از مقالات معتبر بین المللی سعی برآن شده است که طرح‌های مخلوط با توجه به نوع سنگدانه و سیمان مصرفی در داخل کشور از مطالعات سالمی و بهفرنیا [18]، فلاح و نعمت‌زاده [19] ، صدرممتازی و فصیحی [20] و بیگی و همکاران [2] استفاده گرده است. اجزای تشکیل دهنده بتن الیافی در این پژوهش شامل آب ($W$)، سیمان ($C$)، ریزدانه ($FA$)، درشت دانه ($CA$)، نانوسیلیس ($NS$)، میزان الیاف ($V_f$)، پودر سنگ آهک ($LSP$) و فوق روان‌کننده ($SP$) می‌باشد که جداول (۱) و (۲) محدوده و مشخصات آماری هر یک از این پارامترها و همچنین مقاومت فشاری را در این مطالعه نشان می‌دهد.

### ۳-۲- مدل بهینه‌سازی طرح مخلوط

فرموله نمودن و تعریف صحیح مساله، بخش عمده‌ای از عملیات بهینه‌سازی می‌باشد. بنابراین لازم است که فرآیندهای مناسبی برای فرمولبندی مسائل بهینه‌سازی تعریف شود. ابتدا تبدیل مسئله مورد نظر به مسئله طراحی بهینه در این فرآیند دنبال خواهد شد [25-21]. جهت ارائه یک مدل بهینه‌سازی برای طرح مخلوط بتن الیافی لازم است که اجزای آن شامل متغیرهای طراحی، تابع هدف و قیود طراحی به صورت مناسب و منطبق با شرایط واقعی فرمول‌بندی شود که در ادامه به جزئیات مربوطه پرداخته خواهد شد.

### ۳-۳- متغیرهای طراحی

برای ایجاد مدل بهینه‌سازی ابتدا می‌بایست مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی تعریف شود. بطور کلی این متغیرها به صورت آزاد بوده و به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی فرض می‌شوند. فرض نمودن مقادیر مختلف برای متغیرها، طرح متفاوت را موجب خواهد شد. این متغیرها تا حد امکان باید مستقل از همدیگر باشند. تعداد متغیرهای مستقل طراحی، درجه آزادی طراحی را برای طرح مشخص می‌کند. اگرچه برخی از متغیرها را می‌توان از ابتدا توسط طراح ثابت فرض نمود و یا شرایط جغرافیایی منطقه موجب تحمیل بعضی از این متغیرها می‌شود،

اما در این تحقیق، با توجه به اهمیت اجزا تشکیل دهنده بتن و میزان تاثیر آن در مقاومت، شامل آب، سیمان، ریزدانه، درشت-دانه، نانوسیلیس به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند. لذا متغیرهای طراحی در مدل بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن عبارتند از:

مقدار وزن آب ($X_1$)، مقدار وزن سیمان ($X_2$)، مقدار وزن ریزدانه ($X_3$)، مقدار وزن درشت‌دانه ($X_4$)، مقدار وزن نانوسیلیس ($X_5$)، میزان الیاف ($X_6$)، مقدار وزن پودر سنگ آهک ($X_7$)، مقدار وزن روان‌کننده ($X_8$).

**جدول ۱.** شاخص آماری مواد تشکیل دهنده بتن الیافی

| Variables | Unit | Min | Mean | Max | STD |
|---|---|---|---|---|---|
| W | kg/m$^3$ | 137.2 | 159.52 | 195 | 16.65 |
| C | kg/m$^3$ | 325.5 | 397.17 | 520 | 49.53 |
| FA | kg/m$^3$ | 804.9 | 849.11 | 960 | 48.94 |
| CA | kg/m$^3$ | 722 | 783.28 | 920 | 86.69 |
| NS | kg/m$^3$ | 0 | 20 | 49.6 | 16.98 |
| $V_f$ | % | 0 | 0.2 | 0.9 | 0.218 |
| LSP | kg/m$^3$ | 0 | 172.47 | 288.9 | 142.77 |
| SP | kg/m$^3$ | 1.75 | 6.192 | 10.5 | 2.39 |

**Table 1.** Descriptive Statistics of mixture proportions

**جدول ۲.** محدوده آماری مقاومت فشاری مورد استفاده

| Variables | No. of data used | Min | Mean | Max | STD |
|---|---|---|---|---|---|
| Salemi and Behfarnia (2013) | 12 | 42.11 | 49.91 | 55.07 | 4.47 |
| Fallah and Nematzadeh (2017) | 7 | 58.8 | 63.74 | 67.1 | 2.60 |
| Sadrmomtazi and Fasihi (2010) | 8 | 30 | 43.65 | 58 | 10.72 |
| Beigi et al. (2013) | 40 | 66.6 | 79.80 | 88.7 | 5.97 |
| All data | 67 | 30 | 68.45 | 88.7 | 15.91 |

**Table 2.** Statistical metrics of compressive strength

### ۳-٤- تابع هدف

شناسائی نیازهای هر طرح و تعریف دقیق هدف از مهمترین بخش‌های یک مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. تابع هدف به‌طور مستقم و یا غیر مستقیم تحت تاثیر متغیرهای طراحی مسئله است. به گونه‌ای که با اعمال قیدهای طراحی بتوان به بهترین پاسخ ممکن رسید. می‌توان توابع هدف متنوعی با توجه به هدف طراح و نوع کار تعریف نمود. به عنوان مثال مقاومت فشاری، روانی، پایائی، دوام و مقابله با عوامل مخرب می‌توانند هر کدام به عنوان تابع هدف انتخاب شوند. در اکثر کارهای اجرائی عدم اطمینان از حصول کسب مقاومت مشخصه موجب بکار بردن سیمان اضافی و غیر اقتصادی شدن هزینه تمام شده می‌شود و همچنین کسب مقاومت بتن در سنین اولیه موجب قالب‌برداری زودتر و تسریع در اجرا و کاهش هزینه‌های ساخت می‌گردد. در این تحقیق، با توجه با اهمیت مقاومت فشاری بتن، سعی می‌شود تا یک رابطه با کمترین خطا نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پیشنهاد گردد. پس تابع هدف مسئله طرح مخلوط بتن الیافی با روابط زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$Fc = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 + c_6x_6 + c_7x_7 \quad (۱)$$

که در این رابطه ضرایب $c$ ضریب تنظیمی برای هر یک از مواد تشکیل‌دهنده ($x_i$) در طرح مخلوط یا متغیر طراحی می‌باشد. همچنین $Fc$ تابع هدف می‌باشد که در این مطالعه مقاومت فشاری بتن الیافی است. لازم به ذکر است که ضرایب متغیرهای طراحی قابل تغییر بوده و در شرایط مختلف دستخوش تغییر می‌گردد.

### ۳-۵- قیود طراحی

تمامی محدودیت‌ها و شرایط و ضوابط موجود در آئین‌نامه‌ها و مقررات و تحقیقات انجام شده و حتی مسائل اجرائی را می‌توان به عنوان قیود طراحی برای مدل بهینه‌سازی در نظر گرفت. پاسخ طرح، زمانی قابل قبول خواهد بود که متغیرهای طراحی تمامی قیدهای مسئله را ارضا نماید. در این تحقیق با توجه به اهمیت نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن الیافی، این محدودیت به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته می‌شود. به منظور تامین شرایط واقعی و مسائل اجرائی، نسبت وزن مواد تشکیل دهنده بتن الیافی و همچنین نسبت وزن به دانسیته هر کدام از متغیرها به عنوان قیدهای فرعی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس محدودیت‌های طرح مخلوط بتن الیافی را می‌توان مطابق روابط زیر به سه بخش اصلی فرموله نمود.

- **محدوده متغیرهای تصمیم یا طراحی**

$$W_x^L \le W_x = W_x^U \quad (۲)$$

که در این رابطه، به ازای x، باید هر بار یک متغیر طراحی (مقدار وزن آب، مقدار وزن سیمان، مقدار وزن ریزدانه، مقدار وزن درشت دانه، مقدار وزن نانوسیلیس، میزان حجمی الیاف، مقدار وزن پودر سنگ آهک، مقدار وزن روان‌کننده) قرار گیرد. عبارات L و U نیز به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه هر یک از متغیرهای طراحی رو نشان می‌دهد.

- **نسبت متغیرهای تصمیم یا طراحی**

$$R_i^L \le R_i < R_i^U \quad (۳)$$

$$R_1 = \frac{W_w+W_{sp}}{W_c} \quad (٤)$$

$$R_2 = \frac{W_w+W_{sp}}{W_c+W_{NS}} \quad (٥)$$

$$R_3 = \frac{W_w+W_{sp}}{W_c+W_{fa}+W_{ca}+W_{NS}+W_{vf}+W_{LSP}} \quad (٦)$$

$$R_4 = \frac{W_{sp}}{W_c+W_{NS}} \quad (٧)$$

$$R_5 = \frac{W_{vf}}{W_c+W_{NS}} \quad (٨)$$

$$R_6 = \frac{W_{NS}}{W_c+W_{NS}} \quad (٩)$$

- **حجم مطلق متغیرهای طراحی**

$$\frac{W_w}{G_w}+\frac{W_c}{G_c}+\frac{W_{fa}}{G_{fa}}+\frac{W_{ca}}{G_{ca}}+\frac{W_{NS}}{G_{NS}}+\frac{W_{vf}}{G_{vf}}+\frac{W_{LSP}}{G_{LSP}}+\frac{W_{SP}}{G_{Sp}}=1000 \quad (۱۰)$$

که در آن G دانسیته هر یک از متغیرهای تصمیم می‌باشد.

### ۳-٦- مدل ریاضی مقاومت فشاری

افزایش مقاومت فشاری بتن الیافی با مخلوط بهینه میان اجزاء تشکیل دهنده آن یکی از اهداف این پژوهش می‌باشد. لذا برای یک تعریف ریاضی میان اجزاء تشکیل دهنده بتن و مقاومت فشاری، نیازمند به یک رابطه برای تعیین مقاومت فشاری می‌باشیم. از این رو، ٦٧ طرح از این نوع بتن، به نرم‌افزار SPSS معرفی گردید تا بتوان از یک رابطه ریاضی به عنوان تابع هدف اول این مطالعه، به عنوان خروجی نرم‌افزار استفاده نمود. یک رگرسیون چند جمله‌ای به این مقادیر برازش داده شده است. به عنوان مثال، برای یک سیستم با n پارامتر ورودی (متغیرهای مستقل) و یک خروجی (متغیر وابسته) y، روش کمترین مربعات (رگرسیون خطی) بکار گرفته شده است. متغیرهای مستقل برای تعیین تابع هدف مقاومت فشاری بتن ($F_c$) شامل $w$، $c$، $FA$، $CA$، $NS$، $Vf$، $LSP$، $SP$ می‌باشد. در این مطالعه، نرم افزار SPSS ورژن ۱۰ برای استفاده رگرسیون چندجمله‌ای بکار گرفته شد. نتایج مدلسازی (**تابع هدف**) برای مقاومت فشاری برای مقاومت فشاری بتن الیافی در رابطه ۱۱ ارائه شده است.

$$Fc = -262.93 + (11.507 * W0.5668) + (0.0412 * C - 43.1212) + (0.1586 * Fa) + (0.2682 * Ca) + (0.5452 * NS) + (4.6826 * VF) + (0.44 * LSP) + (-0.4607 * SP) \quad (۱۱)$$

در معادله فوق بیانگر ارتباط مقاومت فشاری با دیگر مقادیر متغیر بکار برده شده در طرح مخلوط بتن الیافی می‌باشد. با استفاده از رابطه بالا می‌توان مقاومت مشخصه بتن را پیش‌بینی نمود و تخمین زد. ضریب همبستگی رابطه بالا برابر با ۰/۹٦۷ می‌باشد. این مقدار، نشان‌دهنده دقت بالای این رابطه در تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن الیافی می‌باشد که به عنوان تابع هزینه دارای قطعیت مناسبی می‌باشد.

## ٤. بهینه سازی طرح مخلوط بتن الیافی

برای نشان‌دادن توانایی روش پیشنهادی تحقیق در بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن الیافی با استفاده از روش‌های GA و CSA، پنج مثال عددی در نظر گرفته می‌شود. در تمامی این مثال‌ها، هدف حداکثر کردن مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن الیافی می باشد. بر اساس کد بهینه‌سازی نوشته شده در محیط MATLAB ورژن R2014a ، دو برنامه الگوریتم ژنتیک و جستجوی کلاغ برای پیدا کردن طرح مخلوط بهینه بتن در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، انتخاب رتبه‌بندی بر اساس توزیع هندسی نرمال مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد جمعیت اولیه منتخب بین ۱۵ تا ٦۰ متغیر بوده است، زیرا این تغییر میان جمعیت اولیه، باعث دستیابی به مقدار بهینه در جمعیت اولیه می‌شود.

جهت بدست آوردن بهترین مقادیر ضرایب مذکور، برنامه‌ی بهینه‌سازی با دو تنظیم مختلف از پارامترهای تعداد جمعیت اولیه و تعداد تکرارها، یکی با جمعیت اولیه‌ی ۱۵ تایی و ۲۵، تکرار و

دیگری با جمعیت اولیه‌ی ٦٠ تایی و ١٠٠ تکرار با مقادیر گوناگونی از ضرایب الگوریتم‌ها قرار داشتند، به صورت متناوب اجرا شد. برای به دست آوردن یک بازه‌ی مناسب از مقدار ضرایب، ترکیبات مختلف که برای هر ترکیب حداقل ۵ تا ۱۰ اجرا از برنامه ثبت شد، در نظر گرفته شده است. با بررسی روند تغییرات ضرایب و در نهایت بهترین پاسخ‌های خروجی، تاثیر تقریبی این مقادیر بر روی پاسخها مشخص شدند.

هر یک از داده‌های ورودی و خروجی به برنامه، شامل مقاومت فشاری مواد تشکیل دهنده بتن الیافی می‌باشد. در برنامه-ها، بعد از تشکیل جمعیت اولیه از رشته‌های تشکیل شده از پارامترهای ورودی، تابع هدف برای مقاومت فشاری برای هر مرحله افزایش می‌یابد. زمانی که خطاها میان داده‌های ورودی و خروجی به حداقل رسید، تابع هدف اغنا شده و برنامه از کار می‌ایستد و جواب (راه حل) بهینه ارائه می‌گردد. توابع هدف به کار گرفته شده در برنامه‌ها ( رابطه ۱۱) با توجه به شکل (۱) نشان می‌دهد که عموما همگام با افزایش تعداد تکرار، خطا نیز کاهش می‌یابد.

همانگونه که در بالا ذکر شد، برای صحت‌سنجی برنامه‌های نوشته شده با الگوریتم‌های فراابتکاری GA و CSA، ۵ مجموعه از طرح مخلوط قرار داده شده‌اند که با مقادیر واقعی آن در آزمایشگاه مقایسه شده‌اند. بعد از معرفی مقاومت فشاری معین، برنامه‌ها برای ارائه طرح‌های مخلوط بهینه بتن الیافی شروع به کار نموده‌اند. همانگونه که در بالا ذکر شده است، برای پیدا کردن یک طرح مخلوط با کمترین خطا، عدد مربوط به جمعیت اولیه، از ١٥ الی ٦٠ تغییر کرد. از این رو، طرح مخلوط با یک میزان خطای کمینه در دستیابی به مقاومت فشاری بالا، با جمعیت اولیه ٣٠ و ٤٠ برای هر یک از الگوریتم‌های پیشنهادی بدست آمده است. شکل (۲)، درصد خطای میانگین مربوط به مقاومت فشاری و تعداد جمعیت اولیه را برای هر یک از الگوریتم‌های GA و CSA نشان می‌دهد. در این مطالعه محدوده بررسی مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های توسعه داده شده در جدول (۳) گزارش گردیده است. همچنین مقادیر منتخب پارامترها برای الگوریتم GA شامل نرخ جهش (mutation) و تقاطع (crossover) به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۹ می باشد. همچنین برای الگوریتم CSA نیزطول پرواز (flight length) برابر با ۳ و پارامتر احتمال آگاهی (awareness probability) نیز ۰/۲ می باشد.

**جدول ۳.** محدوده بررسی پارامترهای الگوریتم‌ها

| Algorithm's parameters | Range |
|---|---|
| **GA** | |
| Mutation rate | 0.1 – 0.5 |
| Crossover rate | 0.1 - 1 |
| **CSA** | |
| Flight length | 1 - 10 |
| Awareness probability | 0.1 – 0.9 |

**Table 3.** Range of developed algorithm's parameters

**شکل ۱.** رابطه میان تابع هدف و تعداد تکرار برای الگوریتم های استفاده شده

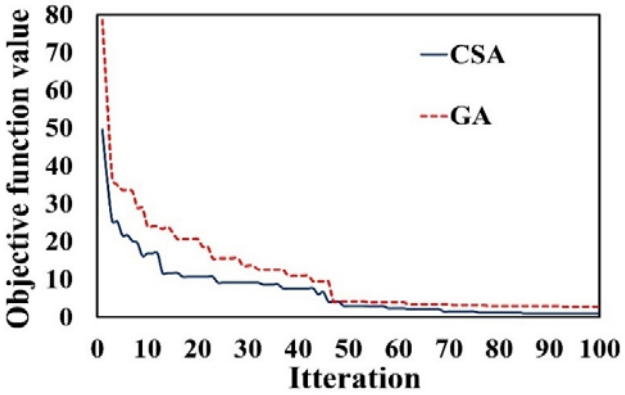


**Fig.1.** Function iterations values with respect to the number of

شکل ۲. رابطه میان تعداد جمعیت اولیه و میانگین خطا برای الگوریتم های استفاده شده

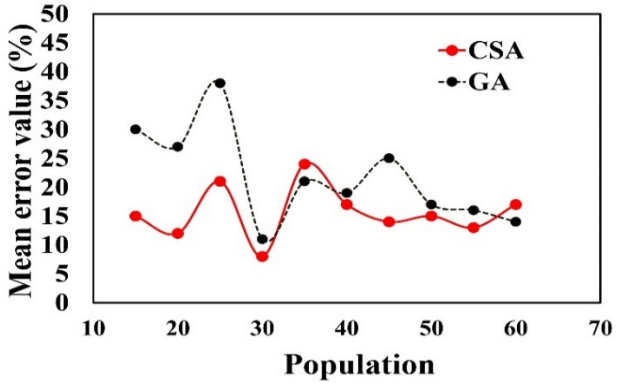


**Fig.2.** Mean error values with respect to the number of populations.

در خصوص طرح‌های مخلوط بهینه (در محدوده ۳۰-۸۰ مگاپاسکال برای بتن خودتراکم الیافی)، همانگونه که در جدول های (۴) و(۵) نشان داده شده است، نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها در حدود ۰/۳۴ الی ۰/۴۷ قرار گرفته است که یکی

از معیارها برای صحت طرح‌های مخلوط پیشنهادی می‌باشد. همچنین، نکته جالب توجه بوده است که می‌توان مقاومت فشاری خوب سنگدانه را با این طرح بهینه مرتبط دانست که در این طرح مقدار پیشنهادی از الگوریتم CSA برای استفاده از مواد الیافی ۰/۰٤ درصد می‌باشد که باز هم به علت گرانی این محصول، الگوریتم توانسته است به میزان قابل توجهی این مقدار را در طرح مخلوط کاهش دهد.

یکی دیگر از نکات قابل توجه در مثال شماره ٤، مقایسه مقاومت فشاری حاصل از هر یک از الگوریتم‌های GA و CSA می‌باشد. اگرچه هدف اصلی این پژوهش افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن الیافی بوده است، اما باید در نظر داشت که میزان هزینه نیز به چه میزان می‌تواند برای مصرف‌کننده، مقرون به صرفه باشد. به همین دلیل، طرح مخلوط پیشنهاد شده از الگوریتم ژنتیک، اگرچه به میزان خیلی جزئی برای مقاومت فشاری بتن الیافی بیشتر از الگوریتم جستجوی کلاغ بوده است، اما باید توجه داشت که تمامی مصالح گران‌قیمت نظیر سیمان و الیاف در این طرح اخلاط نیز بیشتر از روش CSA می‌باشد.

از طرفی شکل (۳) نیز نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم CSA نسبت به الگوریتم GA بوده است. همانطور که نشان می‌دهد، اولا، با داشتن یک طرح مخلوط از سوی هر یک از الگوریتم‌ها مقاومت فشاری بدست آمده از سوی CSA بالاتر از الگوریتم GA می‌باشد (بجز مثال ٤). سپس مشاهده می‌شود که با افزایش کمی از نسبت آب به سیمان، یعنی افزایش آب و کاهش سیمان، و همچنین افزایش CA و LSP، میزان مقاومت فشاری پیشنهادی در مثال شماره ٤، نسبت آب به سیمان برابر ۰/٤٤ به مقدار ثبت شده در آزمایشگاه را نشان داده که در یک دید کلی، می‌تواند باعث کاهش میزان مصرف سیمان و مواد الیافی و دیگر مصالح گران قیمت گردد.

در آخر نیز، میزان خطای محاسبه شده برای چهار جزء اصلی (آب، سیمان، ریزدانه و درشت‌دانه) از طرح مخلوط مشاهداتی و طرح مخلوط پیشنهادی توسط هر یک از الگوریتم‌ها در جدول (٦)و(۷) نشان داده شده است. بر این اساس، میزان خطای میانگین برای مقاومت فشاری پیشنهادی برای چهار جزء اصلی تشکیل‌دهنده بتن که الگوریتم CSA ارائه داد، به مراتب کمتر از الگوریتم GA بوده است. برای مثال پنجم، محدوده خطا برای آب، سیمان، ریزدانه و درشت‌دانه که الگوریتم جستجوی کلاغ ارائه داد به ترتیب ۰/۰۱٦، ۳/۱٦، ۱/۹۳ و ۸/٤٤ بود؛ در حالیکه این مقادیر برای الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۲٤/٦۳، ۱/۲۳، ٦/۲۹ و ۲۳/٦۸ محاسبه گردید.

**جدول٦.** میزان خطای محاسبه شده برای الگوریتم GA به منظور افزایش مقاومت بتن الیافی

| Mean error (%) | CA | FA | C | W | No. |
|---|---|---|---|---|---|
| 9.84 | 8.52 | 4.54 | 2.98 | 11.3 | 1 |
| 7.95 | 5.32 | 0.21 | 23.3 | 2.97 | 2 |
| 15.52 | 19.09 | 12.82 | 4.66 | 21.53 | 3 |
| 11.04 | 30.05 | 0.21 | 3.78 | 10.21 | 4 |
| 13.96 | 23.68 | 6.29 | 1.23 | 24.63 | 5 |

**Table 6.** Calculated error values for GA optimization

**جدول ۷.** میزان خطای محاسبه شده برای الگوریتم CSA به منظور افزایش مقاومت بتن الیافی

| Mean error (%) | CA | FA | C | W | No. |
|---|---|---|---|---|---|
| 7.19 | 10.1 | 2.4 | 2.57 | 13.69 | 1 |
| 5.41 | 2.39 | 0.84 | 12.48 | 5.95 | 2 |
| 14.79 | 19.2 | 7.64 | 6.6 | 25.64 | 3 |
| 7.25 | 8.72 | 5.93 | 5.04 | 9.3 | 4 |
| 3.38 | 8.44 | 1.93 | 3.16 | 0.016 | 5 |

**Table 7.** Calculated error values for CSA optimization

## ۵- نتیجه گیری

هدف اصلی در این مقاله، طراحی بتن خودتراکم الیافی با توانمندی‌های مقاومتی و مالی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری با بهینه سازی در نرم افزار متلب می باشد. برای پیاده سازی مسئله و طراحی مقادیر بهینه طرح مخلوط بتن الیافی، الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) و الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان راهکارپردازشی محاسباتی توسعه داده داده شده است. نتایج زیر با بررسی و تفسیر الگوریتم‌های مورد استفاده و طرح اختلاط‌های منتخب مستخرج گردیده است:

- نتایج نشان داد که نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها در حدود ۰/۳٤ الی ۰/٤۷قرار گرفته است که یکی از معیارها برای صحت طرح‌های مخلوط پیشنهادی می‌باشد. همچنین، نکته جالب توجه این است که در مثال شماره ٤، نسبت آب به سیمان برابر ۰/٤٤ بوده است که می‌توان

مقاومت فشاری خوب سنگدانه را با این طرح بهینه مرتبط دانست که در این طرح مقدار پیشنهادی از الگوریتم CSA برای استفاده از مواد الیافی ۰/۰٤ درصد می‌باشد که باز هم به علت گرانی این محصول، الگوریتم توانسته است به میزان قابل توجهی این مقدار را در طرح مخلوط کاهش دهد.

- با داشتن یک طرح مخلوط از سوی هر یک از الگوریتم‌ها برای هر ۵ مثال، مقاومت فشاری بدست آمده از سوی CSA بیشتر از الگوریتم GA می‌باشد (بجز مثال ٤). سپس مشاهده می‌شود که با افزایش کمی از نسبت آب به سیمان، یعنی افزایش آب و کاهش سیمان و همچنین افزایش CA و LSP، میزان مقاومت فشاری پیشنهادی توان افزایش نسبت به مقدار ثبت شده در آزمایشگاه را دارد که در یک دید کلی، می‌تواند باعث کاهش میزان مصرف سیمان و مواد الیافی و دیگر مصالح گران قیمت گردد.
- نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داده است که عملکرد الگوریتم CSA برای ۵ نمونه منتخب طرح اختلاط با محدوده خطای میانگین (۳/۳۸ – ۱٤/٤۹) درصد در مقایسه با الگوریتم GA با محدوده خطای میانگین (۷/۹۵ – ۱۵/۵۲) نتایج قابل توجه در دقت و همگرایی جواب‌ها ارائه نموده است.

در نهایت با توجه به اثر قابل توجه الیاف در خواص مکانیکی دیگر بتن خودتراکم الیافی از جمله مقاومت کششی، خمشی، چغرمگی و ... پیشنهاد می‌گردد با رویکرد بهینه سازی مقادیر طرح مخلوط، خواص مطرح شده نیز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و اثر هرکدام در قالب بهینه‌سازی‌های تک هدفه و چندهدفه بررسی گردد.

**جدول ٤.** طرح مخلوط برای صحت سنجی (مقاومت ۳۰ الی ۸۰ مگاپاسکال) برای الگوریتم GA

| SP | LSP | $V_f$ | NS | CA | FA | C | W | $F_c$ | No. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.98 | 23.5 | 0 | 0 | 980 | 992 | 343 | 149 | 45.14 | **1** |
| 5.16 | 71.46 | 0.15 | 18.56 | 871 | 952 | 410 | 163 | 55.1 | **2** |
| 9.47 | 1.18 | 0 | 12.67 | 917 | 959 | 429 | 153 | 33.14 | **3** |
| 3.9 | 43.97 | 0.2 | 41.5 | 939 | 825 | 381 | 138 | 80.94 | **4** |
| 9.5 | 85.9 | 0.2 | 34.1 | 893 | 878 | 359 | 171 | 88.82 | **5** |

**Table.4.** Optimized mixture proportions using GA (validated based 30-80 MPa)

**جدول ۵.** طرح مخلوط برای صحت سنجی (مقاومت ۳۰ الی ۸۰ مگاپاسکال) برای الگوریتم CSA

| SP | LSP | $V_f$ | NS | CA | FA | C | W | $F_c$ | No. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.94 | 0 | 0.05 | 1.6 | 1013 | 981 | 341 | 145 | 44.74 | **1** |
| 2.67 | 122.46 | 0.1 | 0 | 898 | 958 | 374 | 158 | 61.37 | **2** |
| 3.23 | 6.42 | 0 | 5.6 | 918 | 915 | 420 | 145 | 35.27 | **3** |
| 7 | 179.68 | 0.04 | 31.5 | 758 | 875 | 376 | 168 | 80.03 | **4** |
| 5.5 | 245.9 | 0.7 | 48.4 | 783 | 832 | 352 | 135 | 93.35 | **5** |

**Table.5.** Optimized mixture proportions using CSA (validated based 30-80 MPa)

**شکل ۳. تغییرات مقادیر طرح مخلوط بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و جستجوی کلاغ**

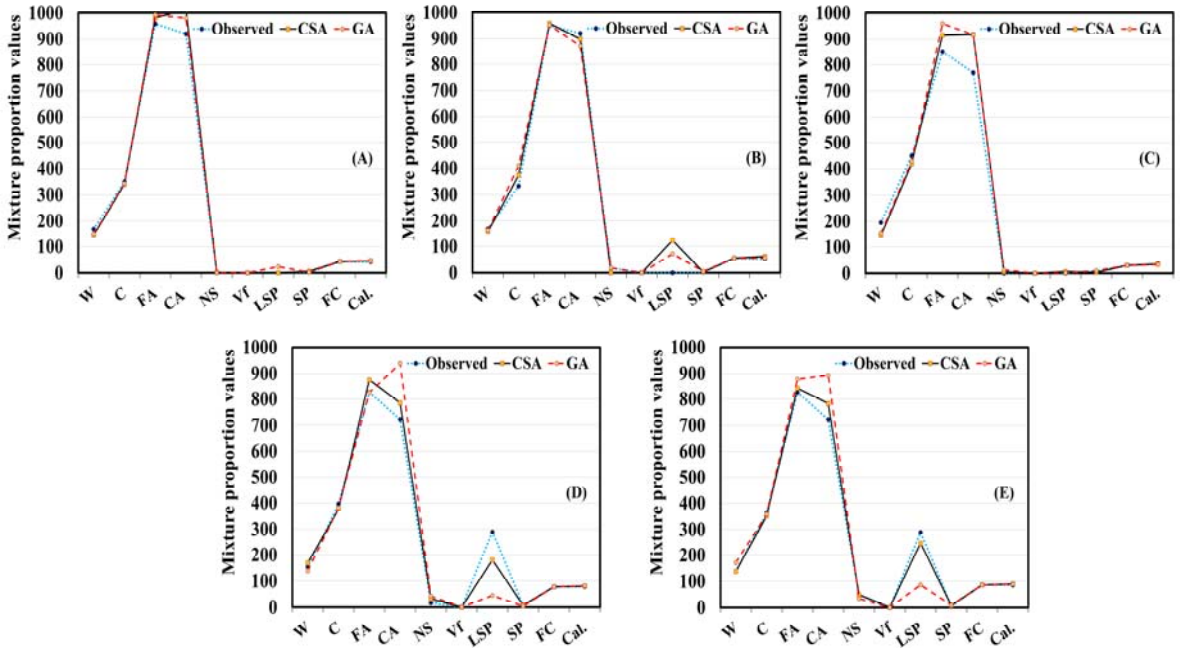


**Fig.3.** Mixture proportions changes based on CSA and GA process.

## مراجع


[1] AzariJafari, H., Amiri, M.J.T., Ashrafian, A., Rasekh, H., Barforooshi, M.J. and Berenjian, J., 2019. Ternary blended cement: An eco-friendly alternative to improve resistivity of high-performance self-consolidating concrete against elevated temperature. Journal of Cleaner Production, 223, pp.575-586.

[2] Beigi, M.H., Berenjian, J., Omran, O.L., Nik, A.S. and Nikbin, I.M., 2013. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*, *50*, pp.1019-1029.

[3] Nik, A.S. and Omran, O.L., 2013. Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO2 using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, *44*, pp.654-662.

[4] Supit, S.W.M. and Shaikh, F.U.A., 2015. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and structures*, *48*(8), pp.2431-2445.

[5] Sobolev, K. and Amirjanov, A., 2010. Application of genetic algorithm for modeling of dense packing of concrete aggregates. *Construction and Building materials*, *24*(8), pp.1449-1455.

[6] Meng, W., Valipour, M. and Khayat, K.H., 2017. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. *Materials and structures*, *50*(1), p.29.

[7] Tošić, N., Marinković, S. and Ignjatović, I., 2016. A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions. *Construction and Building Materials*, *127*, pp.932-944.

[8] Nigdeli, S.M., Bekdas, G., Kim, S. and Geem, Z.W., 2015. A novel harmony search based optimization of reinforced concrete biaxially loaded columns. *Structural Engineering and Mechanics*, *54*(6), pp.1097-1109.

[9] Boindala, S. P., & Arunachalam, V. (2020). Concrete Mix Design Optimization Using a Multi-objective Cuckoo Search Algorithm. In Soft Computing: Theories and Applications (pp. 119-126). Springer, Singapore.

[10] Sun, L., Koopialipoor, M., Armaghani, D. J., Tarinejad, R., & Tahir, M. M. (2019). Applying a meta-heuristic algorithm to predict and optimize compressive strength of concrete samples. Engineering with Computers, 1-13.

[11] Kalemci, E. N., İkizler, S. B., Dede, T., & Angın, Z. (2020, February). Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. In Structures (Vol. 23, pp. 245-253). Elsevier.

[12] Whitley, D., 1994. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, *4*(2), pp.65-85.

[13] TAHERI AMIRI, M.J., Ashrafian, A., Haghighi, F.R. and Javaheri Barforooshi, M., 2019. Prediction of the Compressive Strength of Self-compacting Concrete containing Rice Husk Ash using Data Driven Models. *Modares Civil Engineering journal*, *19*(1), pp.196-206. (in persian)

[14] Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Hematian, M, Kordi, H, 2017, "Optimization of Time and Costs in Critical Chain Method Using Genetic Algorithm", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(4), pp. 871-876.

[15] Taheri Amiri, M.J. Haghighi, F. Eshtehardian, E. Abessi, O, 2018. "Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), pp. 3738-3752.

[16] Goldberg, D.E. and Holland, J.H., 1988. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, *3*(2), pp.95-99.

[17] Askarzadeh, A., 2016. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm. *Computers & Structures*, *169*, pp.1-12.

[18] Salemi, N. and Behfarnia, K., 2013. Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement. *Construction and Building Materials*, *48*, pp.934-941.

[19] Fallah, S. and Nematzadeh, M., 2017. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and building materials*, *132*, pp.170-187.

[20] Sadrmomtazi, A. and Fasihi, A., 2010. Influence of polypropylene fibers on the performance of nano-SiO2-incorporated mortar. *Iranian Journal of science and technology*, *34*(B4), p.385.

[21] Ashrafian, A., Amiri, M.J.T., Rezaie-Balf, M., Ozbakkaloglu, T. and Lotfi-Omran, O., 2018. Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of fiber reinforced concrete incorporating nano silica using heuristic regression methods. *Construction and Building Materials*, *190*, pp.479-494.

[22] Ashrafian, A., Shokri, F., Amiri, M.J.T., Yaseen, Z.M. and Rezaie-Balf, M., 2020. Compressive strength of Foamed Cellular Lightweight Concrete simulation: New development of hybrid artificial intelligence model. *Construction and Building Materials*, *230*, p.117048.

[23] Ashrafian, A., Amiri, M. J. T., Masoumi, P., Asadi-shiadeh, M., Yaghoubi-chenari, M., Mosavi, A., & Nabipour, N. (2020). Classification-Based Regression Models for Prediction of the Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement. Applied Sciences, 10(11), 3707.

[24] ASHRAFIAN, A., TAHERI, A. M. J., & HAGHIGHI, F. (2019). Modeling the Slump Flow of Self-Compacting Concrete Incorporating Metakaolin Using Soft Computing Techniques, *JOURNAL OF STRUCTURAL AND CONSTRUCTION ENGINEERING,* Vol. *6, 2 (24)*, pp. 5-20 (in Persian)

[25] Ashrafian, A., Gandomi, A. H., Rezaie-Balf, M., & Emadi, M. (2020). An evolutionary approach to formulate the compressive strength of roller compacted concrete pavement. *Measurement*, *152*, 107309.

# Optimization of Mixture Proportions of Self-compacted Fiber Reinforced Concrete Incorporating Polypropylene using Genetic and Crow Search Algorithms

**Mohammad Javad Taheri Amri*[1], Ali Ashrafian[2], Javad Berenjian[3], Fatemeh Ashghari-tilaki[2]**

1- Assistant Professor, Higher Education Institute of Pardisan, Mazandaran, Iran (Corresponding Author)
2- M.Sc., Department of Civil Engineering, Tabari University, Babol, Iran
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabari University, Babol, Iran

*Jvd.taheri@heip.ac.ir

## Abstract

This paper has been applied for designing of developed optimal Self-compacted Fiber Reinforced Concrete (SCFRC) incorporating polypropylene for construction of building industry. Concrete is a hybrid material incorporating of cementitious materials, water, aggregates and additive materials. These comprise the constituent materials of concrete. With the development of using materials in construction engineering, concrete blends have been the most widely utilized for building industry in all over the world. The elimination of vibration to compact concrete during placing through the use of self-compacting concrete leads to substantial advantages related to better homogeneity and hence, quality of the construction, improving of the workability, environmentally purposes and enhancement of the productivity by increasing the rate of construction. Over the last few years, the manifested developments of superplasticizers technology allowed great achievements in the conception of concrete mixtures exhibiting self-compacted performance. Since the last decades, some techniques have been presented to reach self-compacting requirements in fresh concrete mixes, on the basis of evaluation of the flowing characteristics of these mixtures. The compressive strength is most applicate characteristic of concrete. However, there are many defects for concrete materials, including low anti cracking performance, bad toughness, low tensile strength. During the failure of the concrete structure under the action of load, the energy consumed is very limited, and many cracks with different size scale will come into being. The utilization of concrete Incorporating with fibers is one of the proper issues of construction industry in last years. The main focus of this research to design a high performance self-compacted fiber reinforced concrete by using an evolutionary algorithm, which is implemented in MATLAB software (R 22019 a) version. Crow Search Algorithm (CSA) and Genetic Algorithm (GA) are statistical ways which are developed by optimization based meta-heuristic solutions. A total of 67 concrete mixtures were considered by varying the levels of key factors affecting concrete strength of concrete, namely, water content (137.2-195 $kg/m^3$), cement content (325.5-520 $kg/m^3$), coarse aggregate content (722-920 $kg/m^3$), fine aggregate content (804.9-960 $kg/m^3$), nano silica content (0-49.6 $kg/m^3$),percentage of volumetric of fibers (0-0.9 %), lime stone powder content (0-288.9 $kg/m^3$) and superplasticizer content (1.75-10.5 $kg/m^3$) were developed to design optimized mixture proportions. The objective function called maximizing concrete strength was formulated as an optimization problem on the basis of Multiple Linear Regression (MLR) method. The constrains including ratio of mixture proportions and absolute volume of mixture design were utilized to obtain an optimal-strength and cost-effective design. The concrete technological constraints were identified as the factors of experimental design for concrete production. The evolutionary implementation of results reached incorporating mixture proportions having strengths in range of 30 - 88.7 MPa. Five numerical examples for optimum mixture design of SCFRC were considered to evaluate the capability and efficiency of CSA and GA algorithm. These results were compared and concluded that CSA (3.38-14.49 % of mean error) performed better than GA (7.95-15.52 % of mean error) for this application. Also, the proposed evolutionary CSA and GA algorithms are found to be reliable and robustness tools to solve and optimize engineering and concrete technological problem.

**Keywords:** Self-Compacted Fiber Reinforced Concrete, Polypropylene, Optimization, Genetic Algorithm (GA), Crow Search Algorithm (CSA)