

بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

محسن مسیحی^۱، سیدفتح اله ساجدی^{۲*}، احمد دالوند^۲

^۱گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۲گروه عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

*: sajadi.ac@gmail.com

چکیده

علاوه بر خواص مکانیکی و دوام بتن، هزینه تولید آن نیز می‌تواند بر انتخاب میزان مصالح تاثیرگذار باشد. از طرف دیگر تغییر کمیت مصالح در طرح مخلوط بتن، بر خواص بتن از جمله مقاومت فشاری، هم‌چنین قیمت تمام شده مصالح آن موثر است و این دو عامل از عوامل بسیار مهم برای تصمیم‌گیری در مصرف میزان مصالح بر اساس قیمت خرید برای تولیدکنندگان در صنعت بتن می‌باشند. بتن با مقاومت بالا در رده بتن‌هایی است که علاوه بر داشتن مقاومت بالا، دارای نسبت آب به مواد سیمانی پایین و تنوع مصالح بیشتری است، لذا انتخاب مقدار دقیق مصالح برای رسیدن به یک رده مقاومتی خاص در این نوع بتن، به نحوی که کمترین قیمت تمام‌شده را دربر داشته باشد، مشکل است. در تحقیق حاضر با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری داده‌های یک تحقیق مرجع، از نظر مقاومت فشاری و قیمت مصالح ساخت بهینه‌سازی شدند تا علاوه بر دستیابی به بالاترین مقاومت ممکن با کمترین هزینه، برای رسیدن به مقاومت‌های هدف نیز بتوان هزینه کمینه را به‌دست آورد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که پاسخ بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری، در مقایسه با نقطه بهینه تحقیق مرجع دارای مقاومتی به میزان ۱۰/۲٪ بالاتر و با هزینه ۸/۲٪ پایین‌تر بود. همچنین با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری توانایی انتخاب طرح مخلوط برای رده‌های مقاومتی مختلف را دارد، بررسی طرح مخلوط‌های مختلف نشان داد که، الگوریتم نسبت به تغییر مقدار مصالح طرح مخلوط با هوشمندی عمل نموده و تغییرات را به نحوی اعمال نموده است که در فرآیند کسب مقاومت‌های مورد نظر، تغییرات میزان مصالح مصرفی در طرح مخلوط، با اعمال کمترین هزینه ممکن، پیشنهاد شوند.

کلمات کلیدی: طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا، الگوریتم ژنتیک فراابتکاری، مقاومت، اسلامپ، قیمت.

۱- مقدمه

با مقاومت بالا است و به هماهنگی کامل بین منابع و کیفیت مصالح و تولیدکننده نیاز دارد. اصولاً طرح مخلوط بتن‌های با مقاومت بالا شامل گام‌های انتخاب مصالح، تعیین مقادیر نسبی و کنترل کیفیت می‌باشد. در بتن‌های با مقاومت بالا، تمام اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط به حد بحرانی خود می‌رسند. بتن‌های با مقاومت بالا را می‌توان به صورت ماده-ای مرکب از سه بخش خمیر سیمان سخت شده، سنگدانه‌ها و ناحیه انتقال^۲ بین سنگدانه‌ها و خمیر در نظر گرفت. تمام این بخش‌ها باید از نظر کمی و کیفی بهینه باشند و در طرح مخلوط به طور دقیق بررسی شوند. بتن‌های با مقاومت بالا عموماً علاوه بر سیمان پرتلند و آب، شامل مصالح دیگری از قبیل فوق روان‌کننده و مواد سیمانی مکمل نیز هستند. با استفاده از موادی نظیر خاکستر بادی و پودر سرباره به عنوان مواد

استفاده از بتن‌های دارای مقاومت بالاتر از بتن‌های معمولی، در صنعت ساخت و ساز بسیار مطلوب می‌باشد. به‌طور کلی بتن توانمند را می‌توان بر حسب مقاومت و دوام آن تعریف نمود. عموماً با افزایش مقاومت بتن، سایر خواص آن نیز بهبود می‌یابند. در کارگاه‌های ساختمانی آمریکای شمالی معمولاً به بتن‌های دارای مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بیش از ۴۲ مگاپاسکال بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود [۱]. این درحالی است که به بتن با مقاومت بیش از ۶۰ مگاپاسکال نیز بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود [۲]. به توصیه میندس و یانگ^۱ باید به تمام جوانب مربوط به تولید این نوع بتن شامل مصالح، طرح مخلوط، حمل و بتن‌ریزی توجه خاص نمود [۳]. کنترل کیفیت یکی از موارد ضروری در تولید بتن‌های

² Interfacial Transition Zone(ITZ)

¹ Minds & Yong

سیمانی مکمل، می‌توان به مقاومت فشاری تا ۱۰۰ مگاپاسکال دست یافت، اما برای کسب مقاومت‌های بالاتر از ۱۰۰ مگاپاسکال استفاده از میکروسیلیس ضروری است [۱]. سوال اصلی در تولید انواع بتن این است که، با چه میزان از مصالح می‌توان به بتنی دست یافت که علاوه بر پاسخ‌گویی به خواص و دوام مورد انتظار طرح، دارای کمترین هزینه نیز باشد. گروهی از محققان استفاده از روش‌های آماری را پیشنهاد داده‌اند، اما روش دیگری که امروزه برای حل مسئله توابع میسوط^۱ استفاده می‌شود، روش الگوریتم‌های تکاملی^۲ است. الگوریتم ژنتیک^۳ یکی از روش‌های جستجوگر، برای یافتن پاسخ مطلوب در بین تعداد پاسخ‌های زیاد و ممکن است.

محققین مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی نسبت به حل مسائل طراحی یا اختلاط در بتن اقدام نمودند. نارکز^۴ یک الگوریتم ژنتیک در کدگذاری واقعی ایجاد کرد تا به عنوان ابزار کمکی برای طراحی تیرهای بتنی پیش تنیده عمل کند. راه حل یافت شده توسط الگوریتم با راه حل واقعی پروژه‌ای که قبلاً یک فرآیند بهینه‌سازی سنتی را گذرانده بود مقایسه شد. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توانست در ۲۱۰ ثانیه راه حل اقتصادی تری پیدا کند. هان و همکاران^۵ [۵] از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی نسبت مخلوط شاتکریت مرطوب استفاده کرد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی میانگین خطای نسبی برابر ۲/۷۵۵٪ را به همراه داشت که نشان‌دهنده یک پیش‌بینی عالی برای ایجاد تابع هدف معقول است. علاوه بر این، الگوریتم ازدحام ذرات، در کمتر از ۶۰ ثانیه نسبت مخلوط بهینه شاتکریت مورد نیاز معدن را محاسبه کرد. به این ترتیب می‌توان گفت که ترکیب دو الگوریتم می‌تواند به عنوان یک راهنمای طراحی کارآمد برای تسهیل تصمیم‌گیری، قبل از مرحله ساخت و ساز استفاده شود.

طبق بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله در سوابق مرتبط با تحقیق، تاکنون محققین زیادی برای یافتن طرح مخلوط بهینه تلاش نموده‌اند و عده‌ای دیگر نیز تاثیر تغییرات میزان مصالح طرح مخلوط را بر تغییر مقاومت بررسی کرده‌اند. استفاده از روش عددی و الگوریتم‌های فراابتکاری برای تخمین طرح اختلاط بهینه‌سازی های

بتنی توسط شیرزادی‌جاوید و همکاران [۶] پیشنهاد شد. این روش یک روش جدید برای پیش‌بینی نسبت مخلوط بهینه است که ویژگی‌های اساسی بتن، از جمله مقاومت خمشی، مقاومت سایشی، اسلامپ، جمع شدگی ناشی از خشک شدن، و مقاومت انجماد-ذوب و هزینه واحد آن را بهبود داد. نتایج این مدل نشان می‌دهد که عملکرد روش ترکیبی معرفی شده، به طور قابل توجهی بهتر از الگوریتم‌های فراابتکاری به تنهایی است. علاوه بر این، عملکرد مخلوط‌های طراحی شده توسط همه الگوریتم‌ها بسیار بهتر از عملکرد نمونه‌های اولیه طراحی شده توسط آزمایش‌های تجربی است.

کنداپلی^۶ [۷] طراحی مخلوط بتن با استفاده از الگوریتم ژنتیک و برنامه توسعه یافته متلب ارائه داد. طرح مخلوط برای رده‌های مختلف بتن با نسبت آب سیمان متفاوت انجام شد. نتایج مطالعه نشان داد که با استفاده تکنیک الگوریتم ژنتیک مقادیر سیمان در حدود ۲۵ الی ۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، حدود ۶ الی ۱۰ درصد کاهش یافته است. پژوهش تیپو و همکاران^۷ [۸] با هدف غلبه بر محدودیت در انتخاب مصالح نسبت به قیمت تمام شده بود. آن‌ها با بکارگیری مدل یادگیری ماشین پیش‌بینی کننده و بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم، برای به حداکثر رساندن مقاومت فشاری، به حداقل رساندن هزینه و کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن، این روش بهینه‌سازی را پیشنهاد دادند. نتایج بهینه‌سازی سه هدفه این گروه نشان می‌دهد که مقاومت بالا بتن در محدوده ۷۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال را می‌توان با حداقل هزینه و با کمترین میزان سیمان ممکن با استفاده از جایگزینی خاکستر بادی و سرباره تولید کرد.

تحقیقات اندکی برای بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا توسط الگوریتم‌ها انجام شده است، لیکن همه محققین، یا بخشی از کار را از الگوریتم استفاده کرده‌اند یا اینکه صرفاً به بهینه‌سازی توسط الگوریتم و یافتن یک طرح مخلوط بسنده نموده‌اند. در این تحقیق آزمایش‌های یک گزارش مبنای کار قرار گرفت و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری ابتدا تابع طرح مخلوط محاسبه شد و سپس این تابع با لحاظ قیمت مصالح و با اعمال قیودی مثل محدودیت نسبت آب به مواد سیمانی و محدوده مجاز اسلامپ، مجدداً توسط الگوریتم ژنتیک

⁵ Han et al.

⁶ Kondapally

⁷ Tipu

¹ Non_polynomial Hard (NP_Hard)

² Evolutionary Computation

³ Genetic Algorithm (GA)

⁴ Narques et al.

۲-۲- مصالح بتن با مقاومت بالا

۲-۲-۱- آب و نسبت آب به مواد سیمانی

بر اساس مطالعات وو و همکاران^۱ نسبت آب به سیمان بتن با مقاومت بالا کم تر از ۰/۴ است و مقاومت ملات تقریباً با سنگدانه‌ها برابر است و به همین دلیل در بعضی موارد ممکن است که توانایی سنگدانه‌ها به تنهایی در نظر گرفته شود [۹]. تاثیر جایگزینی فاضلاب به جای آب بر خصوصیات بتن با مقاومت بالا را الجابری و همکاران^۲ با استفاده از خروجی آب سه کارواش در نقاط مختلف مسقط (پایتخت کشور عمان) بررسی کردند. در این تحقیق هر سه نوع آب با هم مخلوط شده و جزئیات شیمیایی آن از نظر pH، ذرات نامحلول، میزان کلر، سختی، مواد قلیایی و سولفاتی اندازه‌گیری شده بود. این آزمایش‌ها نشان داد هرچند که مواد شیمیایی در مخلوط فاضلاب جمع آوری شده خیلی بیشتر از آب معمولی بود ولی این آب در حد استاندارد ASTM بوده و امکان استفاده از آن در بتن وجود داشته است. طرح مخلوط‌ها را با میزان مختلف آب و فاضلاب به سیمان به نسبت ۰/۳۵ ساخته و میزان جایگزینی فاضلاب به آب از ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ بود. نرخ افزایش مقاومت از سن ۷ به ۲۸ روزه مشابه بتن معمولی عنوان شد اما، پس از ۲۸ روز

بهینه‌سازی شد و تاثیر تغییر میزان هریک از مصالح طرح مخلوط بر مقاومت در سن ۲۸ روزه بتن بررسی گردید. هدف از انجام این تحقیق، بررسی وضعیت تغییر میزان مصالح مصرفی به ازاء رده‌های مختلف مقاومتی در سن ۲۸ روزه، به منظور کمینه نمودن قیمت تمام شده بتن است و به این سوال پاسخ می‌دهد که چگونه می‌توان، میزان مصالح را به نحوی تغییر داد که ضمن دستیابی به مقاومت مورد نظر، با در نظر گرفتن محدوده انتخابی برای اسلامپ و نسبت آب به مواد سیمانی، هزینه مصالح مصرفی در ساخت بتن کمینه شود.

۲- مواد و روش‌ها

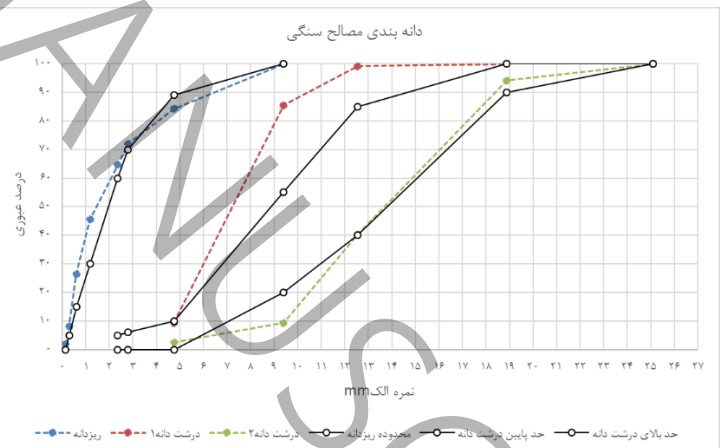
۲-۱- مواد و مصالح مصرفی در تحقیق

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ و میکروسیلیس تولیدی در ایران که مشخصات ارائه توسط کارخانه تولید کننده آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده، و فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربسیلاتی اتر و دو نوع سنگدانه از معادن منطقه خوزستان با دانه‌بندی داده شده در شکل (۱) استفاده شده است.

جدول ۱- وزن مخصوص و ترکیبات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس
Table 1. Specific weight and chemical composition of cement and microsilica

ترکیبات شیمیایی (درصد)	سیمان	میکروسیلیس
SiO ₂	۲۱,۶۸	۹۶,۴
Al ₂ O ₃	۴,۸۲	۱,۳۲
Fe ₂ O ₃	۳,۸۸	۰,۸۷
CaO	۶۵,۴	۰,۴۹
MgO	۲,۰۸	۰,۹۷
SO ₂	۰,۶۸	۰,۱
K ₂ O	۰,۸۸	۱,۰۱
Na ₂ O	۰,۲۵	۰,۳۱
Specific gravity	۳۱۲۰	۲۱۳۰
Fineness (m ² /kg)	۳۳۵	۲۰۰۰

عمل آوری نمونه‌ها، نتایج نشان داد که مقاومت در سن ۲۸ روزه تغییر قابل قبولی داشته و میزان جذب آب دارای تغییر نامحسوسی بوده است [۱۰]. شماسی و همکاران نمونه‌های خود را با جایگزینی ۳٪ نانوسیلیس با سیمان در نسبت‌های متفاوت آب به مواد سیمانی ۰/۳۳،



شکل ۱- دانه‌بندی مصالح سنگی ریز و درشت استفاده شده در تحقیق بر اساس ASTM C33

Figure 1. Grain size distribution curve of fine and coarse aggregates used in research based on ASTM C33

¹ Wu et al.

² AL-Jabri et al.

۰/۳۶، ۰/۴، ۰/۴۴ و ۰/۵ و با لحاظ میزان ثابت دیگر مصالح در طرح‌ها ساختند. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و مقاومت سایشی در سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری شده بود. نتایج نشان داد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت فشاری به ترتیب ۳۴/۴٪، ۳۷،۹٪ و ۳۵،۲٪ و مقاومت سایشی ۳۶/۳٪ نسبت به نمونه با نسبت آب به سیمان ۰،۵ بیشتر بود [۱۱]. بهنود و زبیری تحقیقات آزمایشگاهی بر روی تاثیر نسبت آب به سیمان و میزان میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالای عمل‌آوری شده با دمای بالا را انجام دادند. سه نوع طرح مخلوط با مقدار متفاوت ۰٪، ۶٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس برای عمل‌آوری در شرایط دمایی مختلف با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و چهار طرح مخلوط برای شناخت اثر نسبت آب به مواد سیمانی در بتن، دو طرح با نسبت ۰/۳ و ۰/۴ با و بدون میکروسیل و دو طرح دیگر با نسبت ۰/۳ و ۰/۳۵ که حاوی ۶٪ میکروسیلیس بود و سه طرح دیگر برای اندازه‌گیری تاثیر افزایش میکروسیلیس از ۵٪ تا ۱۰٪ و بطور مشابه با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی ساختند. تحقیق آن‌ها نشان داد که با نسبت های ۶٪ الی ۱۰٪ میکروسیلیس و آب ۶۰ درجه سانتیگراد مقاومت فشاری ۶/۷٪ کاهش یافته و ۱۴/۱٪ کمتر از شرایط معمولی بود. بهترین نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و مقدار میکروسیلیس ۶٪ بود [۱۲].

۲-۲-۲- سیمان و مواد جایگزین آن

مطلوب و همکاران گزارش کردند که در بتن‌های با مقاومت بالا، افزایش میزان میکروسیلیس، کارایی بتن را کاهش داده ولی خواص مکانیکی ابتدایی مثل مقاومت در سن ۲۸ روزه و مدول سکانت را بهبود داده است. همچنین اعلام کردند درصد میکروسیلیس جایگزین، تاثیر مشخصی بر جمع‌شدگی کلی بتن ندارد [۱۳]. بالاگورو^۱ تحقیقاتی در خصوص ذرات نانو و میکرو سیمانی انجام داد و بیان کرد که خواص بتن بهتر شده و شناخت بهتر سازه و رفتارش در مقیاس‌های کوچک نانو یا میکرو، به بهبود خواص بتن کمک می‌کند [۱۴]. سافن^۲ مطالعاتی بر مقاومت فشاری خمیر سیمان پرتلند و ملات حاوی نانوفریت داشت و بیان نمود که با میزان مناسب دوغاب‌های حاوی نانوفریت به میزان ۱٪ وزنی سیمان، افزایش مقاومت فشاری خمیر سیمان و دوغاب به‌طور

متوسط ۴۵٪ خواهد بود [۱۵]. نتایج آزمایش‌های شانانگ^۳ نشان داد که میزان مشخصی از کاربرد توام پوزولان‌های طبیعی و میکروسیلیس می‌تواند مقاومت‌های فشاری و کششی، کارایی و ضریب ارتجاعی را بهبود بخشد، نسبت به زمانی که به‌صورت مجزا در بتن استفاده شوند [۱۶]. امین و ابو الحسن^۴ نمونه با درصدهای مختلف سیمان، ریزدانه، درشت‌دانه متفاوت، میکروسیلیس، آب و دو نوع مصالح نانو ساخته و بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مقاومت‌های کششی و خمشی و ضریب ارتجاعی، بیان کردند که میزان مناسب استفاده از نانوسیلیس ۳٪ و نانوفریت ۲٪ در بتن با مقاومت بالا است. درصد بهبود مقاومت فشاری در استفاده از این مقدار نانوسیلیس و نانوفریت به ترتیب ۱۷٪ و ۲۱٪، بهبود مقاومت کششی برای نانو سیلیس و نانو فریت به ترتیب ۴۴٪ و ۶۶٪ و برای مقاومت خمشی و ضریب ارتجاعی تقریباً با نانوسیلیس ۲۳٪ و با نانوفریت ۲۵٪ بیان شد. افزایش مقدار نانوسیلیس و نانوفریت بیش‌تر از ۲٪ الی ۳٪ وزنی شاخصه‌های فوق را کاهش می‌دهد. همچنین بیان کردند که در مقایسه، نمونه‌های حاوی نانوسیلیس جایگزین با نرخ تقریبی ۱۰٪ بهتر از نانوفریت با همین درصد جایگزینی پاسخ دادند و سنگدانه‌های گرانیتهی با نرخ ۱۰٪ بهتر از دولمیتی با همین نرخ جایگزینی پاسخ دادند [۱۷]. کیشور و همکاران^۵، تاثیر پودر سبوس برنج بر خصوصیات مکانیکی بتن با مقاومت بالا را بررسی کردند. در طرح مخلوط‌ها پودر سبوس با نسبت های مختلف ۰، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ بعنوان جایگزین سیمان، در قالب‌های مکعبی، استوانه‌ای و منشوری برای مقاومت M40 و M50 جایزری شده بود. مقاومت نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه قابل قبول بیان شد. و میزان بهینه جایگزینی پودر سبوس برنج را ۱۰٪ اعلام کردند. افزایش میزان پودر سبوس برنج، باعث کاهش کارایی بتن (اسلامپ٪) ۲۷٪ و ضریب تراکم (۹٪)، مقاومت فشاری، تنش کششی، تنش خمشی و مدول الاستیسیته شده بود [۱۸]. راتان راجا و همکاران^۶ برای بررسی تاثیر افزودنی‌هایی مثل متاکائولین و گل قرمز به جای سیمان، خصوصیات مکانیکی بتن با مقاومت بالا را با طرح مخلوط‌های مختلف در رده مقاومتی M60 بررسی کردند. بهترین میزان متاکائولین و گل قرمز و یا

⁴ Amin & Abu el-hassan

⁵ Kishore et al.

⁶ Rathan Raja et al.

¹ Balaguru

² Sahn

³ Shanang

ترکیب هر دو برای اینکه بیشترین مقاومت، تنش کششی و تنش خمشی را داشته باشند، به ترتیب ۸٪، ۴٪ و ۱۰٪ اعلام شد. استفاده از هر یک از مواد باعث کاهش کارایی بتن شده و نرخ تغییرات بتن با مقاومت بالا با جایگزینی متاکائولین و گل قرمز را از سن ۷ روزه به ۲۸ روزه به ترتیب ۰/۷۷۳ و ۰/۸۲۳ اعلام کردند [۱۹]. سرنیا و همکاران^۱ امکان ساخت بتن سبک با مقاومت بالا را با استفاده از خاکستر بادی به جای سنگدانه مطرح کردند. در آن تحقیق از ۴ نوع سنگدانه مصنوعی ساخته شده از خاکستر بادی استفاده شد. نتایج نشان داد که برای رسیدن به مقاومت بالا میزان سیمان و روان کننده باید افزایش یابد و این افزایش، ریسک افزایش وزن بتن را تا 2000 Kg/m^3 یعنی مرز بتن سبک افزایش می‌دهد. مقاومت سن ۲۸ روزه نمونه‌ها از ۴۵ تا ۵۳ مگاپاسکال و وزن آنها از ۱۸۴۰ تا ۱۸۶۰ گزارش شده بود [۲۰].

۲-۲-۳- فوق روان کننده

خطیب و منگات^۲ مقدار تخلخل و حباب‌های هوای خمیر سیمان را تحت تاثیر استفاده از فوق روان کننده و شرایط عمل‌آوری مختلف بررسی کردند. نمونه‌های ساخته شده را با و بدون فوق روان کننده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته و در شرایط دمای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد در رطوبت ۲۵٪، ۵۵٪ و ۱۰۰٪ به مدت ۲۸ روز و ۶ ماه عمل‌آوری نمودند. عمل‌آوری در دمای بالا با شرایط آب و هوایی گرم شبیه‌سازی شده بود. نتایج نشان داد که استفاده از فوق روان کننده، باعث کاهش میزان کلی حجم هوای خمیر شده و به نظر نمی‌رسد که بر قطر اغلب منافذ تاثیرگذار باشد و درصد حباب‌های کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر با کاربرد فوق روان کننده افزایش یافته بود. همچنین اعلام کردند که روش عمل‌آوری تاثیر قابل توجهی بر میزان تخلخل و ساختار حباب دارد و منافذ کوچکتر و به مقدار کمتر هنگامی تولید می‌شود که خمیر سیمان بلافاصله در معرض رطوبت قرار گیرد [۲۱]. لازنیوسکا پیکارچیک و زابوسکی^۳ تاثیر فوق روان کننده و مواد کف‌زدا بر روی خصوصیات رئولوژیکی و کارایی ملات و بتن خودتراکم را بررسی کردند. ۱۲ طرح مخلوط با نسبت های آب به مواد سیمانی ۰/۴ با فوق روان کننده‌های پلی کربوکسیلاتی و پلی کربوکسیلاتی‌تر و شش نوع مواد کف‌زدا ساخته و نتیجه گرفتند که

کف‌زدا میزان حباب هوا را کاهش می‌دهد و ملاتی که کف‌زدا داشته باشد دچار جداشدگی مصالح نمی‌شود همان‌طور که ملات‌های با روانی مشابه و حاوی فوق روان کننده جداشدگی نداشتند. گیرش اولیه ملات با کف‌زدا نسبت به ملات با فوق روان کننده بیش تر بود. استفاده از کف‌زدا باعث کاهش نیاز به فوق روان کننده می‌شود ولی تاثیر بر مقاومت نداشت و مقاومتش مشابه مقاومت بتن حاوی فوق روان کننده بود. افزودن مواد کف‌زدا و فوق روان کننده تاثیر بسزایی در مقاومت در برابر یخبندان بتن خود تراکم داشت [۲۲]. السادی^۴ در یک تحقیق آزمایشگاهی با یک طرح مخلوط ثابت، مقدار ۰، ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ نسبت وزنی سیمان را با فوق روان کننده جایگزین نمود. همه نمونه‌ها در شرایط یکسان برای ۲۸ روز عمل‌آوری شده بودند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش مقدار فوق روان کننده اسلامپ بیش تر شده و مقاومت طرح‌ها به ترتیب ۴۴، ۵۲، ۵۴، ۵۵، ۴۳ مگاپاسکال بود. نتیجه‌گیری کرد که بهترین مقدار فوق روان کننده در ۱٪ وزن سیمان بوده و استفاده بیش تر باعث کاهش مقاومت می‌شود [۲۳]. منصور و همکاران^۵ سه نوع کاهنده آب را برای کاهش نسبت آب به سیمان بتن بکار بردند تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از ۱/۵٪ روان کننده معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مقاومت سن ۲۸ روزه ۴۵/۶ مگاپاسکال با اسلامپ ۱۱۰ میلی‌متر داشت که نمونه بتن بدون روان کننده همین طرح اسلامپش ۰ بود. با ۱٪ روان کننده و نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ مقاومت ۳۳ مگاپاسکال و اسلامپ ۹۵ میلی‌متر داشت که نمونه بدون روان کننده آن ۳۵ میلی‌متر اسلامپ داشت. افزودن ۱/۵٪ روان کننده کندگیر در طرح با نسبت آب به سیمان ۰/۵ مقاومت ۴۷ مگاپاسکال و اسلامپ ۱۹۰ داشت درحالی که نمونه طرح بدون روان کننده کندگیر ۱۵ میلی‌متر اسلامپ داشت. با افزودن ۱٪ فوق روان کننده در طرح های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ مقاومت های ۶۳/۵ و ۵۳/۵ مگاپاسکال و اسلامپ های ۲۵ و ۲۲۵ میلی‌متر حاصل شد. برای همه طرح مخلوط‌ها بیش ترین اسلامپ زمانی حاصل شده بود که کاهنده آب در ابتدا و بصورت یک جا به مصالح اضافه شده بود

⁴ Alsadey

⁵ Mansor et al.

¹ Cernya et al.

⁴ Khatib & Mangat

³ Lazniewska-Piekarczyk & Szwabowski

و مقاومت بیشتر زمانی حاصل شد که کاهنده بصورت تدریجی به مصالح اضافه شده بود [۲۴].

۲-۲-۴- سنگدانه‌ها

تاثیر نوع سنگدانه‌های درشت بر خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا توسط اوزتوران و چچن^۱ گزارش شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقاومت معمولی بتن با سنگدانه‌های بازالتی قابل دسترس است و با شن معمولی نیز مشابه همین مقاومت به دست می‌آید، در صورتی که بتن با سنگدانه‌های آهکی به مقاومت بیش‌تری می‌رسد. بتن با مقاومت بالا با سنگدانه‌های بازالتی و آهکی خرد شده، دست یافتنی است [۲۵]. آیتسین و مهتا^۲ گزارش کردند که برای مصالح و طرح مخلوط مشابه استفاده از سنگدانه‌های دیاباز و آهکی، نسبت به کاربرد سنگدانه‌های گرانیتی و رودخانه‌ای، به تولید بتنی با مقاومت بیش‌تر منجر می‌شود، [۲۶]. بشر و همکاران^۳ تاثیر کیفیت سنگدانه‌ها را بر مقاومت‌های فشاری و کششی بتن با مقاومت بالا آزمایش کردند و نشان دادند که کیفیت سنگدانه‌ها به‌طور مشخص بر هر دو نوع مقاومت تاثیرگذار است و سنگدانه‌های سرباره‌ای بیش‌ترین تاثیر را بر مقاومت‌ها دارد؛ این در حالی است که سنگدانه‌های آهکی کم‌ترین تاثیر را دارند [۲۷]. کیلیچ و همکاران^۴ تاثیر نوع سنگدانه‌ها را بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی بتن با مقاومت بالا بررسی کردند. از پنج نوع سنگدانه مختلف در طرح‌های اختلاط استفاده شده بود. از طرف دیگر با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس با سیمان در هر طرح، در نسبت ثابت آب به سیمان ۰/۳۵ نمونه‌ها ساخته شد. نتایج نشان داد که مقاومت‌های فشاری و سایشی سنگدانه‌های بازالتی، آهکی و ماسه‌ای مساوی و برای کوارتز و گابور کم‌تر بود [۲۸].

۲-۳- تعیین طرح مخلوط بهینه با استفاده از الگوریتم

۲-۳-۱- معرفی الگوریتم‌های تکاملی

از سال ۱۹۶۰ تقلید از پدیده‌های طبیعی برای استفاده در الگوریتم‌های توانمند جهت حل مسائل مشکل بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفت که

شیوه‌های محاسبه تکاملی^۵ نام گرفتند. در طی ۲۰ سال گذشته، نوع جدیدی از الگوریتم ابتکاری به وجود آمد که اساسا تلاش می‌کند روش‌های اکتشافی پایه را با هدف جستجوی کارا و موثر فضای جستجو، در چارچوب‌های سطح بالاتر ترکیب کند. به زبان ساده الگوریتم، جمعیتی از نتیجه‌ها را برای مساله ایجاد می‌کند. سپس بهترین نتایج انتخاب می‌گردند. این نتیجه‌ها دوباره تولید می‌شوند که محیط جدید دیگری از نتیجه‌ها را در موقعیت متفاوتی از محیط قبلی ایجاد می‌نمایند. این فرایند زمانی تمام می‌شود که نتایج به دست آمده با معیارهای خاص منطبق باشند. امروزه این روش‌ها، الگوریتم‌های فراابتکاری نامیده می‌شوند. الگوریتم ژنتیک یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های ابتکاری می‌باشد که از آن برای بهینه‌سازی توابع مختلف استفاده می‌شود. در این الگوریتم اطلاعات گذشته با توجه به موروثی بودن الگوریتم استخراج شده و در روند جستجو استفاده می‌شود [۲۹]. پرسپترون^۶ یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که در دسته یادگیری با نظارت قرار می‌گیرد. الگوریتم پرسپترون یک الگوریتم دسته‌بندی دو دویی بوده و نوعی از دسته‌بندی است که می‌تواند با توجه به بردار ورودی تصمیم بگیرد که این ورودی متعلق به یک کلاس هست یا خیر. از طرفی این الگوریتم یک دسته‌بند خطی است، به این معنا که پیش‌بینی‌های خود را با توجه به ترکیب خطی وزن‌دار ورودی الگوریتم انجام می‌دهد. همچنین این الگوریتم به دلیل اینکه ورودی‌های خود را به صورت تک‌تک در زمان بررسی می‌کند، یک الگوریتم برخط می‌باشد. الگوریتم پرسپترون در سال ۱۹۵۷ در لابراتوار کرنل آرونوتیکال^۷ به وسیله فرانک روزنبلات^۸ ابداع شد [۳۰]. در واقع این الگوریتم جزو اولین شبکه‌های عصبی^۹ مصنوعی است که به کار گرفته شده است. در سال ۱۹۷۵ هالند^{۱۰} یک مفهوم اولیه از الگوریتم ژنتیک^{۱۱} ارائه داد. در این الگوریتم پس از تشکیل تشکیل جمعیت اولیه عملگرهایی مانند فرزندآوری یا جهش ژنتیکی بهبود چرخه‌ای جمعیت را برعهده داشته و در نهایت توسط یک انتخاب تصادفی هدفمند جمعیت چرخه بعدی انتخاب می‌شوند. نسل‌گیری متعدد در چرخه‌های بعدی باعث بهبود جمعیت شده و افراد جامعه را

² Cornell Aeronautical Laboratory

⁸ Rosenblatt

⁴ Artificial Neural Network (ANN)

¹⁰ Holland

⁶ Genetic Algorithm (GA)

¹ Ozturan & Cecen

² Aitcin & Mehta

³ Beshr et al.

⁴ Kilic et al.

⁵ Evolutionary Computation

⁶ Perceptron

به سمت بهبود مستمر سوق می‌دهد [۳۱]. الگوریتم کلونی مورچه‌ها^۷ برای دسترسی به غذا در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو^۸ به عنوان یک راه حل چند عامله برای مسائل مشکل بهینه‌سازی مثل فروشنده دوره‌گرد ارائه شد. این الگوریتم بر اساس روش مورچگان برای یافتن غذا پایه‌گذاری شده و فرایند آن به این نحو است که هر مورچه در راه یافتن غذا اثری از خود به جا می‌گذارد. پس در صورتی که یک مورچه غذایی را پیدا کند به دلیل رفت و برگشت، دو اثر در مسیر می‌گذارد و اگر مورچه‌ای پیدا نکرده باشد یک اثر دارد، بنابراین مورچه دیگری اگر بخواهد مسیری را انتخاب کند، مسیری را انتخاب خواهد کرد که دارای اثر بیش‌تری است و به‌این ترتیب در چرخه‌های متفاوت مسیرهای بهتر انتخاب می‌گردد [۳۲]. الگوریتم پرندگان یا ازدحام ذرات^۹ توسط کندی و ابرهارت^۴ در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی، الهام گرفته از طبیعت و براساس تکرار می‌باشد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها بود [۳۳]. الگوریتم رقابت استعماری با مدلسازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی - سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. الگوریتم رقابت استعماری^۵ که توسط آتش‌پزگرگری و لوکاس^۶ ارائه شد، مجموعه اولیه‌ای از جواب‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد. این جواب‌های اولیه در الگوریتم ژنتیک با عنوان کروموزوم، در الگوریتم ازدحام ذرات با عنوان ذره و در الگوریتم رقابت استعماری نیز با عنوان کشور شناخته می‌شوند. الگوریتم رقابت استعماری با روند خاصی، این جواب‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود داده و در نهایت جواب مناسب مساله بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را در اختیار می‌گذارد. پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست همسان‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب تشکیل می‌دهند. این الگوریتم با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدل‌سازی ریاضی بخش‌هایی از این فرایند، عملگرهایی را در قالب منظم به صورت الگوریتم ارائه می‌دهد که می‌توانند به حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کمک کنند [۳۴]. الگوریتم شبیه‌سازی ذوب فلزات، الگوریتم محبوبی است که پس از معرفی توسط

کرکپاتریک و همکاران^۷ به‌طور گسترده‌ای در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده است. این روش یک سبک جستجوی محلی تصادفی بر پایه اصولی از طبیعت می‌باشد. پایه این الگوریتم بر اساس پرش قطره‌ای فلزات در حین سرد شدن است که مطابق عدد خاصی انجام می‌شود [۳۵]. وان فریسیج^۸، جزو اولین کسانی بود که از رویه‌های پایه و ساده زنبوری برای حل مسائل ترکیبی بهینه‌سازی استفاده کرد. او سامانه زنبوری را معرفی نمود و از آن برای حل مساله معروف فروشنده دوره‌گرد استفاده کرد. الگوریتم زنبور، شامل گروهی مبتنی بر الگوریتم جستجو است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. این الگوریتم شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای گروه‌های زنبور عسل است. هر زنبور پس از یافتن غذا توسط رقص خود سه پیام را برای دیگر زنبورها اعلام می‌کند. این پیام‌ها حامل مشخصات فاصله، نوع و جهت محل گل مورد نظر تا کندو است. این مشخصات فرایندی را تشکیل می‌دهد تا دیگر زنبورها نیز به محل غذا دست یابند و بهترین گل را پیدا کنند [۳۶]. الگوریتم‌های دیگری نیز در سالیان اخیر معرفی شدند که از آن جمله می‌توان به الگوریتم چکه‌آب‌های هوشمند^۹ یا چکه نام برد. این الگوریتم یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه هوش گروهی است که توسط شاه‌حسینی ابداع شد. الگوریتم چکه‌آب، الگوریتمی است که به گونه گروهی کار می‌کند و الهام‌گرفته از طبیعت است. این الگوریتم در اصل برای بهینه‌سازی ترکیبی به کار برده می‌شود، ولی می‌توان آن را برای بهینه‌سازی پیوسته نیز آماده ساخت. این الگوریتم نخستین بار در سال ۲۰۰۷ میلادی، برای یافتن گشایش و راه حل برای مساله فروشنده دوره‌گرد پیشنهاد شد. از آن پس، شماری از پژوهشگران در پی بهبود و به کار بستن این الگوریتم برای مشکل‌ها و مسائل گوناگون بوده‌اند. اساس الگوریتم چکه‌آب مسیریابی در یافتن پایین‌ترین نقطه از یک سطح است [۳۷]. در سال ۲۰۱۷ توسط آقای کابلی و همکاران الگوریتم بهینه‌سازی قطره‌های باران^{۱۰} ارائه شد. این الگوریتم بر اساس روش یافتن پایین‌ترین نقطه توسط قطره‌های باران به جستجو برای یافتن پایین‌ترین جواب مساله می‌پردازد و کارایی

⁶ Lucas

⁷ Kirkpatrick et al.

⁸ Von Frisch

¹ Intelligent Water Drops (IWD)

² Water Fall Optimization (RFO)

⁷ Ant Colony Optimization (ACO)

² Dorigo

⁹ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁴ Kenned & Eberhart

¹¹ Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

آن در حل چند مساله ریاضی و مقایسه آن با دیگر الگوریتم‌ها از نظر سرعت و همگرایی پاسخ‌ها مقایسه شده و نتایج رضایت بخش بود [۳۸].

الگوریتم‌ها توانایی بسیار خوبی در یافتن پاسخ بهینه در فضای جستجوی وسیع و پرشمار دارند. بتن‌های با اجزای ساخت متعدد نیز دارای طرح مخلوط‌های متنوع هستند و لذا یافتن طرح مخلوط بهینه همواره مورد سوال بوده است. الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های ابتکاری است که از آن برای بهینه‌سازی توابع مختلف استفاده می‌شود. در این الگوریتم اطلاعات گذشته با توجه به موروثی بودن الگوریتم استخراج شده و در روند جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا توسط هالند، یک مفهوم اولیه از الگوریتم ژنتیک ارائه شد و سپس دیگران آن را بسط دادند. الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های جستجوی تصادفی هستند که بر اساس انتخاب طبیعی و نسل‌شناسی طبیعی کار می‌کنند.

ساجدی و رزاک رابطه بین مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روزه بتن با مقاومت بالا را مدل‌سازی نمودند. برای این کار با استفاده از ۵۰ طرح مخلوط ۶۵۰ نمونه متفاوت ساخته شده از سیمان، آب، میکروسیلیس، سنگدانه و فوق‌روان‌کننده تهیه کرده و سپس مقاومت فشاری در سنین ۱،۳، ۷ و ۲۸ روزه را به دست آوردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که رگرسیون چندبعدی، شبکه عصبی و رگرسیون خطی به ترتیب کارایی بهتری نسبت به یکدیگر در تخمین مقاومت در سن ۲۸ روزه نسبت به مقاومت در سن ۷ روزه دارند. رابطه بیان شده انطباق خوبی با شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها در اتاق بخار و غوطه‌وری در آب آهک اشباع در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های بدون سرباره داشت [۳۹]. گوررا و کیوسیس^۱ با استفاده از یک الگوریتم غیرخطی در MATLAB، طراحی بهینه ساختار بتن‌های مسلح را ارائه دادند و در این کار هزینه فرم دادن، بتن‌ریزی و آرماتور بندی توسط کارگرها و همچنین مصالح به‌عنوان ورودی‌های تابع مساله در نظر گرفته شدند. در این تحقیق هدف بهینه‌سازی ابعاد تیرها و ستون‌ها در بتن‌های مسلح بود که با استفاده از آزمایش‌های مختلف و برنامه نویسی الگوریتم در MATLAB محقق شد [۴۰]. چاپرا و همکاران^۲ برای پیش بینی سیر رشد مقاومت در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه از شبکه مصنوعی و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند.

¹ Guerra & Kiouisis

² Chopra et al.

در این پژوهش ۴۹ طرح مخلوط با مصالح معمول و ۲۷ طرح با اضافه نمودن خاکستر بادی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و بررسی‌ها نشان از عملکرد بهتر شبکه عصبی در پیش بینی رشد مقاومت در طول زمان بود [۴۱]. مسیحی و همکاران موازنه قیمت-زمان-محدودیت منابع، در پروژه‌های چندحالتی را با یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده حل کرده که در این الگوریتم شانس اعضاء بهتر جمعیت، بیش‌تر بوده و نتیجه موازنه بسیار رضایت‌بخش بود [۴۲]. حقیقی و احمدی نجل بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری و منحنی فرمان برای سیستم‌های چند مخزنی با استفاده از مدل سازگار شونده شبیه‌ساز با کاربرد الگوریتم ژنتیکی که خودکار بود، را ارائه دادند. در این طرح الگوریتم در چرخه‌های متوالی بهینه‌سازی انجام داده است [۴۳].

طبق بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله در سوابق مرتبط با تحقیق، تاکنون پژوهشگران زیادی برای یافتن طرح مخلوط بهینه که در آن قیمت و مقاومت بتن مد نظر باشد، تلاش نموده اند و عده ای دیگر نیز تاثیر تغییرات مصالح طرح مخلوط را بر تغییر مقاومت بررسی کرده‌اند از جمله این محققین به سیمون^۳ می‌توان اشاره نمود که با استفاده از روش آماری نسبت به بهینه سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا اقدام کرده بود [۴۴]، در این تحقیق با استفاده از داده های آزمایشگاهی گزارش سیمون و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری ابتدا تابع طرح مخلوط محاسبه شد و سپس این تابع با لحاظ قیمت مصالح و با اعمال قیودی چون محدودیت نسبت آب به سیمان و محدوده مجاز اسلامپ، مجدداً توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شد. سپس تاثیر تغییر میزان هریک از مصالح طرح مخلوط در توازن بین مقاومت سن ۲۸ روزه و هزینه بتن بررسی گردید و مشخص شد که الگوریتم با هوشمندی مقدار مصالح را به نحوی تغییر می‌دهد که ضمن دستیابی به مقاومت مدنظر، هزینه مصالح طرح کمینه باشد.

۲-۳-۲- بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

۲-۳-۱- معرفی الگوریتم ژنتیک فراابتکاری تحقیق

در الگوریتم بکار رفته ابتدا جمعیت اولیه تشکیل شده سپس علاوه بر عملگرهای عمومی الگوریتم ژنتیک، از چند روش ابتکاری نیز استفاده شده تا برای الگوریتم، جستجو در فضای پاسخ‌ها متنوع تر و بهینه باشد.

³ Simon

سپس با انتخاب جمعیت جدید بر اساس انتخاب تصادفی با احتمال انتخاب فرد بهتر، فرآیند ادامه می یابد. برای درک بهتر موضوع عملگرها در ادامه شرح داده شده اند.

- الف- تشکیل جمعیت اولیه
- ب) عملگر تصادفی فرزند آوری
- ج) عملگر جهشی
- د) عملگر اصلاح نژاد
- ه) شایستگی فرد در جامعه
- و) اعمال جریمه
- ز) انتخاب نسل جدید
- ح) نخبه پروری

برای تمام مراحل فوق در نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شده و پاسخ ها مستخرج این فرآیند است.

۲-۲-۳-۲- تشکیل تابع طرح مخلوط توسط الگوریتم

در این مرحله، هدف رسیدن به توابعی برای اسلامپ و مقاومت است که با اعمال نسبت حجمی مصالح در آن ها، بتوان با یک تقریب خوب اسلامپ و مقاومت در سن ۲۸ روزه آن طرح مخلوط را پیش بینی کرد. داده های اولیه، آزمایش های انجام شده برای طرح مخلوط های مختلف و نتایج طرح ها برای اسلامپ و مقاومت در سن ۲۸ روزه است. شرط این که تابعی بتواند رابطه بین نسبت درصد مصالح در طرح مخلوطها را با مقاومت یا اسلامپ مشخص نماید، داشتن مجموع مربعات کمتر در اختلاف بین خروجی تابع پیش بینی طرح مخلوط، با نتایج آزمایشگاهی همان طرح است. به عبارتی هر تابع پیشنهادی، دارای یک خروجی برای اسلامپ یا مقاومت به ازاء طرح مخلوط خواهد بود که این خروجی اختلافی با نتیجه آزمایشگاه دارد و تابعی روابط بین نسبت مصالح در رسیدن به مقاومت یا اسلامپ را بهتر نشان خواهد که دارای مجموع مربعات کمتر در اختلاف باشد.

الف: تابع طرح مخلوط

تابع پیشنهادی این پژوهش تابعی است که در آن از قبل ضرایب و توان عوامل مشخص نباشد و از طرفی از آنجا که نسبت های حجمی طرح مخلوط همه زیر عدد یک می باشند مضرب سه تایی آنها بسیار ناچیز و در حد صفر خواهد بود، بنابراین تابع از عوامل اصلی و حاصلضرب دوتایی از آن ها تشکیل شده است.
-مصالح اصلی عبارتند از:

جدول ۲- معرفی مصالح مصرفی در تحقیق

Table 2. Introduction of the used materials in the research

ریزدانه	درشت دانه	فوق روان کننده	میکروسیلیس	سیمان	آب
X ₆	X ₅	X ₄	X ₃	X ₂	X ₁

-تابع مساله

$$F_{(x)} = \left(\sum_{n=1}^6 A_n * X_n^{B_n} \right) + \left(\sum_{n=1}^5 X_n * \sum_{m=n+1}^6 C_{nm} * X_m \right) + K \quad (1)$$

معلومات تابع مساله (۱):

درصد های حجمی با توجه به داده های آزمایشگاهی در نظر گرفته می شود.

مقاومت نمونه ها برای تابع مقاومت و اسلامپ نمونه ها برای تابع اسلامپ درصد حجمی اجزاء بتن در نمونه ها = X

مجهولات تابع مساله (۱):

A_n= ضریب عددی برای درصد حجمی اجزاء بتن

B_n= توان برای درصد حجمی اجزاء بتن

C_{nm}= ضریب عددی برای حاصلضرب درصد های حجمی اجزاء بتن

K= عدد ثابت

ب: حل مساله توابع با استفاده از الگوریتم

برای حل مساله، با توجه به تعداد اجزاء بتن با مقاومت بالا و تابع مذکور در رابطه (۱)، تعداد ۲۸ مجهول وجود دارد که همانند شکل (۲) بصورت یک رشته مرتب می شوند. الگوریتم یکبار برای مجهولات محاسبه تابع مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه و بار دیگر برای محاسبه مجهولات تابع اسلامپ اجرا می شود.

A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆	C ₄₅	C ₄₆	C ₅₆	K
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---

شکل ۲- نمای کروموزوم مساله در الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Figure 2. Chromosome view of the problem in meta-heuristic genetic algorithm

۲-۳-۳- بهینه‌سازی تابع طرح مخلوط

در این پژوهش، هدف کار علاوه بر یافتن طرح مخلوطی که موازنه‌ای بین مقاومت و قیمت ساخت آن باشد، تامین مقاومت هدف مشخصی با کمترین قیمت امکان پذیر نیز می باشد. برای رسیدن به این هدف، مبنای کار تابع مقاومت خواهد بود و با اعمال قیمت مصالح، موازنه لازم صورت می‌گیرد. به همین منظور مجدداً تابع مقاومت (۱) نیاز به بررسی دارد با این تفاوت که این بار ضرایب و توان‌ها (K, C_{nm} و B_n و A_n) مشخص است و لازم است نسبت های حجمی مصالح (X) به گونه ای باشد که مقاومت خروجی تابع و قیمت مصالح آن نسبت ها اقتصادی

باشد. با توجه به در دست داشتن تابع مقاومت کافی است قیمت هر طرح را در تابع برازش آن دخیل کرده و سپس در فرایند انتخاب نسل بعد با استفاده از چرخه رولت، انتخاب انجام گردد. از این رو، نسبت های تصادفی مصالح برای متغیر های مجهول تابع در نظر گرفته می‌شوند؛ این نسبت ها حتما باید در محدوده پذیرفته شده برای بتن های با مقاومت بالا بوده و بهتر آن است که بسیار نزدیک به محدوده انتخابی طرح های آزمایشگاهی باشند. کاربرد تابع اسلامپ نیز به این دلیل است که نمونه های با اسلامپ غیرمقبول تغییر یافته و مجدداً به چرخه الگوریتم ارجاع داده شوند.

$X_{N,1}$	$X_{N,2}$	$X_{N,3}$	$X_{N,4}$	$X_{N,5}$	$X_{N,6}$
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

شکل ۳- نمای کروموزم تابع بهینه‌سازی

Figure 3. Chromosome view of the optimization function

برای یافتن میزان خطای تابع ارائه شده توسط الگوریتم با واقعیت، ابتدا چند طرح مخلوط مختلف که قبلاً جزئیات آنها در رده‌های مختلف مقاومتی از الگوریتم گرفته شدند را در آزمایشگاه ساخته و پس از اندازه گیری اسلامپ بتن تر طبق استاندارد ASTM C143 و تعیین میزان مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM C39، نتایج با خروجی الگوریتم مقایسه می‌شوند.

$$0.98 \leq \sum_{n=1}^6 X_n \leq 1 \quad (2)$$

$$\text{Fitness Function} = F_{(\text{strenght-cost})} = F_{(cs)} + F_{(p)} \quad (3)$$

$$F_{(p)} = CN - \sum_{n=1}^6 (X_n * P_n) \quad (4)$$

قیمت ماده n به ازاء متر مکعب P_n :

با داشتن کروموزم و جمعیت اولیه و روابط محاسباتی (۲) تا (۴) فرآیند الگوریتم و عملگرها اجرایی می‌شود. روند کار تا جایی ادامه پیدا می کند که جواب بهتری پیدا نشود یا تغییرات بسیار جزئی باشد.

۲-۳-۴- صحت سنجی الگوریتم

۳- تحلیل نتایج روش‌ها

۳-۱- داده‌های آزمایشگاهی

در گزارش سیمون به عنوان پژوهش مرجع ابتدا ۳۶ طرح مخلوط با لحاظ دامنه مشخص برای مصالح آزمایش شدند. مشخصات و نتایج آنها به شرح جداول (۳) تا (۵) است.

جدول ۳- محدوده حجمی مصالح مصرفی در طرح مخلوط‌های سیمون [۴۴]

Table 3. The volumetric range of materials used in Simon's mixture design [44]

مصالح	آب (m^3)	سیمان (m^3)	میکروسلیس (m^3)	فوق روان‌کننده (m^3)	درشت دانه (m^3)	ریزدانه (m^3)
مشخصه	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
کمترین مقدار ترکیب	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵
بیشترین مقدار ترکیب	۰/۱۸۵	۰/۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۴۲۴	۰/۲۹۲۴

جدول ۴- نسبت‌های حجمی طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی سیمون [۴۴]
 Table 4. Volume ratios of Simon's design of laboratory mixtures [44]

شماره طرح	شماره ساخت	آب (m ³)	سیمان (m ³)	میکروسیلیس (m ³)	فوق‌روان‌کننده (m ³)	درشتدانه (m ³)	ریزدانه (m ³)	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)	اسلامپ (mm)
۵	۷	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴۲۸۴	۰/۲۵	۴۸/۵	۱۳
۱۱	۶	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۱۷۴	۰/۲۵	۴۸/۵	۱۰۲
۱۳	۱۵	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۹۲۴	۵۳/۲	۵۷
۱۵	۳۸	۰/۱۶۵۶	۰/۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۵	۵۸/۱	۵۱
۱۶	۸	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۴۲۴	۰/۲۵	۵۳/۱	۳۵
۲۰	۱۳	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۶۷۴	۵۰/۹	۱۱۸
۲۲	۴	۰/۱۸۵	۰/۱۴۷۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵	۴۸/۲	۶۷
۲۸	۱۶	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۷۸۴	۵۳/۶	۲۹
۳۷	۳۰	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۶۵۶	۵۶	۳۵
۳۸	۲۶	۰/۱۷۶۷	۰/۱۴۱۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵	۵۳/۲	۲۹
۴۸	۲۸	۰/۱۷۲۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۷۷۱	۵۸/۱	۱۷۱
۶۳	۲۷	۰/۱۷۲۵	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۱۳۱	۰/۲۵	۵۵/۲	۱۲۴
۶۵	۳۱	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۱۵۶	۰/۲۵	۵۱/۱	۳۲
۶۶	۲۵	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۱۲۸	۰/۲۶۲۸	۵۹/۸	۷۶
۷۰	۲۹	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴	۰/۲۷۱	۵۴/۵	۵۱
۷۱	۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۵/۲	۵۷
۷۸	۱۱	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۰۳	۰/۲۵۰۳	۵۱/۷	۱۲۷
۸۷	۲۴	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۲۱۲	۰/۲۷۱۲	۵۱	۶۷
۸۹	۱۹	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۸۲۴	۵۴/۳	۳۸
۹۱	۹	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۷۳	۰/۲۵۷۳	۶۰/۴	۲۰۰
۹۸	۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۳۲۴	۰/۲۵	۵۱/۹	۳۲
۱۰۱	۱۰	۰/۱۷۱۲	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۱۱۲	۰/۲۵	۵۳/۶	۲۲
۱۰۳	۱۴	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۲۱	۰/۲۵	۵۴/۶	۶۴
۱۱۰	۲۱	۰/۱۷۱۲	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۶۱۲	۵۳/۲	۵۱
۱۱۶	۳۳	۰/۱۷۲۵	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۶۳۱	۵۶/۲	۱۱۴
۱۲۳	۳۶	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۴۱۲	۰/۲۶۲	۶۱	۹۹
۱۲۷	۱۲	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۰/۲	۹۹
۱۶۳	۲۰	۰/۱۶۵۶	۰/۱۳۴۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۰۶۷	۰/۴۲۳۴	۰/۲۵۲۶	۶۰/۸	۹۵
۵	۲۲	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴۲۸۴	۰/۲۵	۵۴/۱	۲۵

۱۱	۲۳	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۱۷۴	۰/۲۵	۴۸	۱۱۴
۲۰	۳۴	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۶۷۴	۵۱/۶	۱۲۷
۳۸	۳۹	۰/۱۷۶۷	۰/۱۴۱۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵	۴۵/۵	۲۵
۷۱	۳۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۶۵/۳	۱۰۸
۱۲۷	۱۸	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۴/۱	۹۲
۱۲۷	۳۲	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۷/۲	۱۲۱
۱۲۷	۳۷	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۴/۶	۱۰۲

جدول ۵- نسبت های وزنی طرح مخلوط های آزمایشگاهی سیمون (Kg/m³) [۴۴]

Table 5. Weight ratios of Simon's laboratory mixture design (Kg/m³) [44]

شماره ساخت	آب (m ³)	سیمان (m ³)	میکروسیلیس (m ³)	فوق روان کننده (m ³)	درشتدانه (m ³)	ریزدانه (m ³)
۷	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۸۵/۲۴	۶۲۵
۶	۱۸۵	۴۵۹/۸۸۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۲۵
۵	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۱۳/۸۴	۶۲۵
۳۸	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۸۵/۲۴	۶۲۵
۸	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۱۳	۱۸۵	۶/۴۰۵	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۶۸/۵
۴	۱۶۰	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۹۵/۱۲	۶۷۸
۱۶	۱۶۰	۴۳۶/۸	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۸۰/۵۶	۶۲۵
۳۰	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۶۸/۵
۲۶	۱۸۵	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰/۷۸	۶۲۵/۷۵
۲۸	۱۶۰	۸/۴۳۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۱۲۴/۲۴	۶۲۵
۲۷	۱۶۰	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۱۵۰/۲۴	۶۲۵
۳۱	۱۶۰	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۷۳۱
۲۵	۱۷۶/۷	۴۳۲/۱۰۴	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۲۵
۲۹	۱۷۱/۲	۴۶۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۵۳
۵	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۹۶
۱۱	۱۷۱,۲	۴۶۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۶۹/۱۲	۶۲۵
۲۴	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۱۱۳/۸۴	۶۲۵
۱۹	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۹	۱۶۰	۴۳۶/۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۷۰۶
۱۷	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۴۰	۶۷۷/۵
۱۰	۱۷۶/۷	۴۴۲/۱۰۴	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۲۵

۱۴	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۹۴/۶	۶۲۵
۲۱	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۳۳	۱۷۲/۵	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۷۴/۰۶	۶۲۵
۳۶	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۱۲	۱۶۰	۴۳۶/۸	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰	۶۶۴
۲۹	۱۷۲/۵	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰	۷۵۶۵۷
۲۲	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۲۳	۱۶۵/۶	۴۶۸	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰	۶۲۵
۳۴	۱۷۲/۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۴۰	۶۹۲/۷۵
۳۹	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۷۳/۲۸	۶۵۷
۳۵	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۵۸/۹۸	۶۴۳/۲۵
۱۸	۱۶۵/۶	۴۱۹/۰۱۶	۳۵/۱۴۵	۷/۰۳۵	۱۱۰۰/۸۴	۶۳۴
۳۲	۱۶۰	۴۳۶/۸	۴۲/۶	۶/۳	۱۰۷۱/۲	۶۵۵
۳۷	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵

۲-۳- محاسبات الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

۱-۲-۳- تعریف توابع مقاومت و اسلامپ

خروجی ضرایب و توان‌ها برای مقاومت ۲۸ روزه جدول (۶) و اسلامپ جدول (۷) بدست آمده و حداقل مجموع مربعات به ترتیب ۲۸۰ و ۷۷۸۸ شد.

برای حل مساله، داده‌های جدول آزمایشگاهی همان داده‌های گزارش مرجع بود. با استفاده از روابط (۶) و (۷) و بر اساس فرآیند الگوریتم،

جدول ۶- ضرایب تابع مقاومت فشاری الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 6. Coefficients of compressive strength function of meta-heuristic genetic algorithm

F(Cs)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۰/۵۲۶۵۱	۲۰۲۷/۹۱۴	۰/۵۰۱۸۱۶	۱۷۰۹/۰۸	۰/۵۹۲۱۴۶	۰/۲۶۷۲۳
B	۲	۵/۰۵۹۸۳۰۴۷۹	۰/۶۶۶۶۶۷	۱	۰/۶۶۶۶۶۷	۰/۶۶۶۶۶۷
C ₁	-	-۲۵۹/۰۷	-۱۶۲۶/۷۸	-۳۱۱۲/۲۲	-۶۱/۲۱۵۷	۸۱/۷۸۴۳۳
C ₂	-	-	۳۲۱۵/۱۸۷	-۱۳۶۴/۹۵	-۳/۲۱۵۶۷	۱۱۲/۲۹۵۷
C ₃	-	-	-	-۲۸۷۴/۶۶	-۸۴۸/۸۱۷	۶۶۲/۹۸۴۱
C ₄	-	-	-	-	۱۹۹۷/۰۴۲	-۸۵۸/۷۸۵
C ₅	-	-	-	-	-	۶۳/۷۸۴۳۳
K _{Cs}	-	-	-	-	-	۳۸/۸۹۳۰۸

جدول ۷- ضرایب تابع اسلامپ الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 7. Slump function coefficients of meta-heuristic genetic algorithm

F(Slump)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۳۰۷۸/۹۳۴	-۳۸۶۲/۶۲	-۲۷۰۴/۷۶	۲۳۹۲/۶۶۱	-۱۰۸۸/۳۵	-۹۸۰/۹۳۸
B	۱/۴۵۸۸۹۱	۱/۳۹۹۰۹	۱	۱/۳۳۳۳۳	۱/۲۵	۲

قیمت (دلار)	آب سیمانی	اسلامپ (mm)	ریزدانه (m3)	درشتدانه (m3)	فوق‌روان‌کننده (m3)	میکروسیلیس (m3)	سیمان (m3)	آب (m3)	مقاومت فشاری (MPa)	پاسخ با انتخاب دامنه یکنواخت
۲۰/۱۲	۰/۳۵۷	۱۳۵	۰/۲۸۹۵	۰/۴	۰/۰۰۷۴	۰/۰۱۳	۰/۱۳	۰/۱۶	۵۹/۵۶	الگوریتم
۲۰/۴۲	۰/۳۵۷	۷۵/۷۹	۰/۲۸۷	۰/۴۰۹	۰/۰۰۵۴	۰/۰۱۴	۰/۱۳۳	۰/۱۶	۵۴/۷	گزارش مرجع

C_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-۱۷۸۹/۸۶۱
K_{Sl}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۹۰/۸۴۵۲

۳-۲-۲- بهینه‌سازی تابع مقاومت- قیمت
 سیمون در گزارش خود طرح مخلوط منتج از آزمایشات را بهینه‌سازی نموده و مقاومت ۵۴/۷ مگاپاسکال با طرح مخلوطی به شرح ذکر شده در جدول (۸) را نقطه بهینه بیان نمود. برای بهینه‌سازی با الگوریتم فراابتکاری، ابتدا الگوریتم با دامنه معرفی شده در گزارش مرجع سیمون به شرح جدول (۳)، راه اندازی گردید و پاسخ بهینه الگوریتم، ذکر شده در جدول (۸)، نشان داد که در دامنه معرفی شده، الگوریتم فراابتکاری

قابلیت یافتن پاسخ بهتری نسبت به گزارش مرجع دارد. در مرحله بعد برای بهینه‌سازی تابع مقاومت- قیمت (۴) و به جهت نشان دادن توانایی بیشتر الگوریتم فراابتکاری و تحقیق در این خصوص که آیا امکان دارد با تغییر دامنه مصالح به پاسخ‌های بهتری دست یافت، دامنه‌ها و قیمت مصالح به شرح جدول (۹) لحاظ شده و در فرآیند بهینه‌سازی اعمال شدند.

جدول ۸- دامنه‌های گزارش مرجع و قیمت در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی طرح مخلوط در الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 8. Ranges of reference report and price considered for optimization of mixed design in meta-heuristic genetic algorithm

جدول ۹- دامنه‌های جدید و قیمت در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی طرح مخلوط در الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 9. The new domains and the price considered for the optimization of the mixed design in meta-heuristic genetic algorithm

مصالح در الگوریتم	آب (m ³)	سیمان (m ³)	میکروسیلیس (m ³)	فوق‌روان‌کننده (m ³)	درشتدانه (m ³)	ریزدانه (m ³)	اسلامپ (mm)	آب مواد سیمانی
مشخصه	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	-	-

کمترین	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۵	۰/۳۷	۰/۲۰	۸۰	۰/۲۹
بیشترین	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷۴	۰/۴۵	۰/۳۰	-	-
قیمت به دلار	۰/۱۲۱	۸۰/۲۲۸	۳۸۰/۱۷۸	۵۷/۱۴	۵/۰۰۷	۷/۱۴	-	-

مصالح بومی و در دامنه جدید وفق جدول (۹)، محاسبه شد که پاسخ‌های مربوطه به صورت حجمی و وزنی در جدول (۱۰) و (۱۱) آورده شده است.

با توجه به اینکه پاسخ حاصله توسط الگوریتم از دامنه تعریفی جدید بهتر از پاسخ یافت شده توسط الگوریتم از دامنه گزارش مرجع بود، لذا بهترین پاسخ از نظر توازن بین مقاومت، قیمت و همچنین اقتصادی ترین طرح مخلوط برای مقاومت‌های مشخصه مختلف با توجه به قیمت

جدول ۱۰- نسبت های حجمی طرح مخلوط های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 10. Volume ratios of optimal mixture design of meta-heuristic genetic algorithm

مشخصه طرح در الگوریتم	مقاومت فشاری (MPa)	آب (m ³)	سیمان (m ³)	میکروسیلیس (m ³)	فوق روان کننده (m ³)	درشتدانه (m ³)	ریزدانه (m ³)	اسلامپ (mm)	آب سیمانی	قیمت (دلار)
۱	۴۸	۰/۱۵۷۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۴۳۶۴	۰/۲۱۹۱	۱۱۵	۰/۴۷۰	۱۸/۲۳
۲	۴۹	۰/۱۸۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۴۱۱	۰/۲۳۸۲	۱۲۷	۰/۴۷۳	۱۸/۲۶
۳	۵۰	۰/۱۸۹۲	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۳۹۸۴	۰/۲۵۵۸	۱۴۰	۰/۴۷۳	۱۸/۳
۴	۵۱	۰/۱۸۸	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۳۸۲۹	۰/۲۷۲۹	۱۴۵	۰/۴۷۰	۱۸/۳۴
۵	۵۲	۰/۱۸۱	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۳	۰/۳۸۱۳	۰/۲۸۱۹	۱۳۱	۰/۴۵۳	۱۸/۴
۶	۵۳	۰/۱۷۲۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۴	۰/۳۸۲۳	۰/۲۸۹۴	۱۱۳	۰/۴۳۰	۱۸/۴۶
۷	۵۴	۰/۱۶۳۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۷۱	۰/۳۸۷۵	۰/۲۹۲۶	۱۰۰	۰/۴۱۰	۱۸/۵
۸	۵۵	۰/۱۶۱۲	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵۲	۰/۳۸۹۸	۰/۲۹۲۴	۱۰۰	۰/۴۰۳	۱۸/۵۵
۹	۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵۵۲	۰/۳۹۷۲	۰/۲۹۰۱	۱۰۱	۰/۳۹۰	۱۸/۵۶
۱۰	۵۷	۰/۱۵۳۴	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۳۹۹۳	۰/۲۸۹۹	۱۰۰	۰/۳۸۴	۱۸/۶۲
۱۱	۵۸	۰/۱۵۰۷	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶۴۶	۰/۴۰۱۷	۰/۲۸۹۶	۱۰۳	۰/۳۷۷	۱۸/۶۵
۱۲	۵۹	۰/۱۵۰۴	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶۸۸	۰/۴۰۱۵	۰/۲۹۱۸	۱۱۳	۰/۳۷۶	۱۸/۷
۱۳	۶۰	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۳۵	۰/۴۰۰۸	۰/۲۹۲۷	۱۲۳	۰/۳۷۵	۱۸/۷۲
۱۴	۶۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۰۸	۰/۲۹۳	۱۳۴	۰/۳۷۵	۱۸/۷۳
۱۵	۶۱	۰/۱۵	۰/۱۴۳	۰/۰۱۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۳۹۳۹	۰/۲۹۲۹	۸۶	۰/۳۱۷	۲۰/۸
۱۶	۶۲	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۲۱۹	۰/۰۰۷۳۹	۰/۳۷۷۹	۰/۲۹۲۸	۸۰/۵	۰/۲۹۱	۲۴/۷۸

جدول ۱۱- نسبت های وزنی طرح مخلوط های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری (kg/m³)

Table 11. Weight ratios of the optimal mixture design of meta-heuristic genetic algorithm (kg/m³)

شماره طرح الگوریتم	مقاومت فشاری (MPa)	آب	سیمان	میکروسیلیس	فوق روان کننده	درشتدانه	ریزدانه
--------------------	--------------------	----	-------	------------	----------------	----------	---------

۱	۴۸	۱۸۷/۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۱۳۴/۶۴	۵۴۷/۷۵
۲	۴۹	۱۸۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۰۸۲/۱۲	۵۹۵/۵
۳	۵۰	۱۸۹/۲	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۰۳۵/۸۴	۶۳۹/۵
۴	۵۱	۱۸۸	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۹۹۵/۵۴	۶۸۲/۲۵
۵	۵۲	۱۸۱	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۹۹۱/۳۸	۷۰۴/۷۵
۶	۵۳	۱۷۲	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۹۹۳/۹۸	۷۲۳/۵
۷	۵۴	۱۶۳/۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۹۴۵	۱۰۰۷/۵	۷۳۱/۵
۸	۵۵	۱۶۱/۲	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۵/۴۶	۱۰۱۳/۴۸	۷۳۱
۹	۵۶	۱۵۶	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۵/۷۹۶	۱۰۳۲/۷	۷۲۵/۲۵
۱۰	۵۷	۱۵۳/۴	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۶/۳	۱۰۳۸/۱۸	۷۲۴/۲۵
۱۱	۵۸	۱۵۰/۷	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۶/۷۸	۱۰۴۳/۶۲	۷۲۵
۱۲	۵۹	۱۵۰/۴	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۲۲۴	۱۰۴۳/۹	۷۲۹/۵
۱۳	۶۰	۱۵۰	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۷۱۷	۱۰۴۲/۰۸	۷۳۱/۷۵
۱۴	۶۰/۳۵	۱۵۰	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۷۷	۱۰۴۲/۰۸	۷۳۲/۵
۱۵	۶۱	۱۵۰	۴۴۶/۱۶	۲۷/۰۵	۷/۷۷	۱۰۴۲/۱۴	۷۳۲/۲۵
۱۶	۶۲	۱۵۰	۴۶۸	۴۶/۶۴۷	۷/۷۵۹	۹۸۲/۵۴	۷۳۲

در جدول (۱۳) توانمندی الگوریتم نسبت به گزارش مرجع مقایسه شده است. این مقایسه نشان میدهد که برای ساخت بتنی با مقاومت مشابه پاسخ گزارش مرجع، الگوریتم ژنتیک فراابتکاری طرح مخلوطی با ۹/۲ درصد هزینه کمتر پیشنهاد داده و برای ساخت بتنی با هزینه طرح گزارش مرجع، در الگوریتم طرح مخلوطی با ۱۰/۹ درصد مقاومت بیشتر دست یافتنی است.

جدول ۱۳- مقایسه توانمندی الگوریتم ژنتیک فراابتکاری با روش گزارش

Table 13. Comparison of meta-heuristic genetic algorithm capability in reporting method

توانمندی الگوریتم	هزینه مشابه برای الگوریتم	مقاومت مشابه برای الگوریتم	پاسخ گزارش	پاسخ ها
+۱۰/۹%	۶۰/۶۹		۵۴/۷	مقاومت (MPa)
			۵۴/۷	
	۲۰/۴۲			هزینه (\$))
-۹/۲%		۱۸/۵۳	۲۰,۴۲	

طرح مخلوط شماره ۱۴ بهترین پاسخ الگوریتم براساس مصالح آزمایش شده است.

۳-۲-۳- مقایسه طرح مخلوط بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری با پاسخ بهینه گزارش مرجع

همانگونه که در جدول (۱۲) قابل مشاهده است، پاسخ بهینه یافته شده توسط الگوریتم ژنتیک فراابتکاری، نسبت به پاسخ گزارش مرجع دارای ۱۰/۲ درصد مقاومت بالاتر با ۸/۲ درصد هزینه کمتر است.

جدول ۱۲- مقایسه پاسخ بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری با روش گزارش

Table 12. Comparison of the optimal response of the meta-heuristic genetic algorithm in the reporting method

مقایسه	بهینه الگوریتم	بهینه گزارش	پاسخ ها
+۱۰/۲%	۶۰/۳	۵۴/۷	مقاومت (MPa)
-۸/۲%	۱۸/۷۳	۲۰/۴۲	هزینه (\$))

۳-۲-۴- صحت‌سنجی نتایج حاصل از الگوریتم

تاکنون همه موارد گفته شده جنبه تئوری داشته و نیاز بود در عمل نیز میزان تحقق طرح‌ها بررسی گردد، به همین منظور ۴ طرح مخلوط از جدول (۱۵) ساخته شدند تا مقاومت آزمایشگاهی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه با مقاومت حاصل از خروجی الگوریتم مقایسه گردند. داده‌های آزمایشگاهی گزارش مرجع، در کشور دیگری و با مصالح خاص آن منطقه ساخته شده بود و مسلماً با شرایط موجود در این تحقیق متفاوت هستند. لذا در گام اول چند طرح از طرح مخلوط‌های مرجع ساخته شدند. از طرف دیگر با توجه به وجود تفاوت کیفیت مصالح دو منطقه، امکان تغییر در میزان حجم مصالح نبود، به این دلیل که جزئیات طرح مخلوط-های سیمون رعایت نمی‌شد و لذا به همین دلیل تصمیم گرفته شد غیر از فوق روان‌کننده که تاثیر آن بر میزان اسلامپ زیاد بود و از طرفی بر

حجم کلی بتن تاثیرگذار نبود، مابقی مصالح با همان میزان استفاده شوند تا از نتیجه آزمایش‌ها، درصدی به عنوان انحراف یا خطای مغایرت جنس مصالح پژوهش مرجع با پژوهش حاضر در نظر گرفته شود. پس از انجام چند طرح مخلوط برای یافتن میزان فوق روان‌کننده مناسب و به منظور رسیدن به اسلامپ طرح مخلوط مربوطه، نهایتاً دو طرح مخلوط داده شده در جدول (۱۴) برای یافتن میزان تفاوت مصالح دو کشور انجام شدند که این اختلاف جنس مصالح، تفاوتی به مقدار ۲/۵٪ در مقاومت فشاری نسبت به آزمایش‌های مرجع ایجاد می‌کرد. در مرحله بعد ۴ طرح خروجی از الگوریتم و طرح بهینه رگرسیون ساخته شده و میزان اسلامپ و مقدار مقاومت در سن ۲۸ روزه آنها با خروجی-های الگوریتم و رگرسیون مقایسه شدند که نتایج در جدول (۱۵) داده شده است.

جدول ۱۴- آزمایش میدانی دو طرح منتخب از داده‌های مرجع

Table 14. Field test of two selected designs from reference data

جدول ۱۵- صحت‌سنجی آزمایشگاهی طرح مخلوط‌های خروجی از الگوریتم

Table 15. Experimental validation of the design of mixtures output from the algorithm

ردیف	شماره طرح الگوریتم	آب (kg)	سیمان (kg)	میکروسیس (kg)	فوق‌روان‌کننده (kg)	درشتدانه (kg)	ریزدانه (kg)	اسلامپ طرح (mm)	اسلامپ نمونه	مقاومت ۲۸ روزه طرح (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه نمونه	درصد اختلاف
۱	۱	۱۸۷/۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۱۳۴/۶۴	۵۴۷/۷۵	۱۱۵	۱۲۵	۴۸	۴۶/۵۴	-۳/۰
۲	۵	۱۸۱	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۶	۹۹۱/۳۸	۷۰۴/۷۵	۱۳۱	۱۲۷	۵۲	۵۲/۲۴	+۰/۵
۳	۱۰	۱۵۳/۴	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۶/۳	۱۰۳۸/۱۸	۷۲۴/۷۵	۱۰۰	۱۰۵	۵۷	۵۸/۶۵	+۲/۸
۴	۱۴	۱۵۰	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۷۷	۱۰۴۲/۰۸	۷۳۲/۵	۱۳۴	۱۴۲	۶۰/۳۵	۶۲/۱۲	+۲/۸

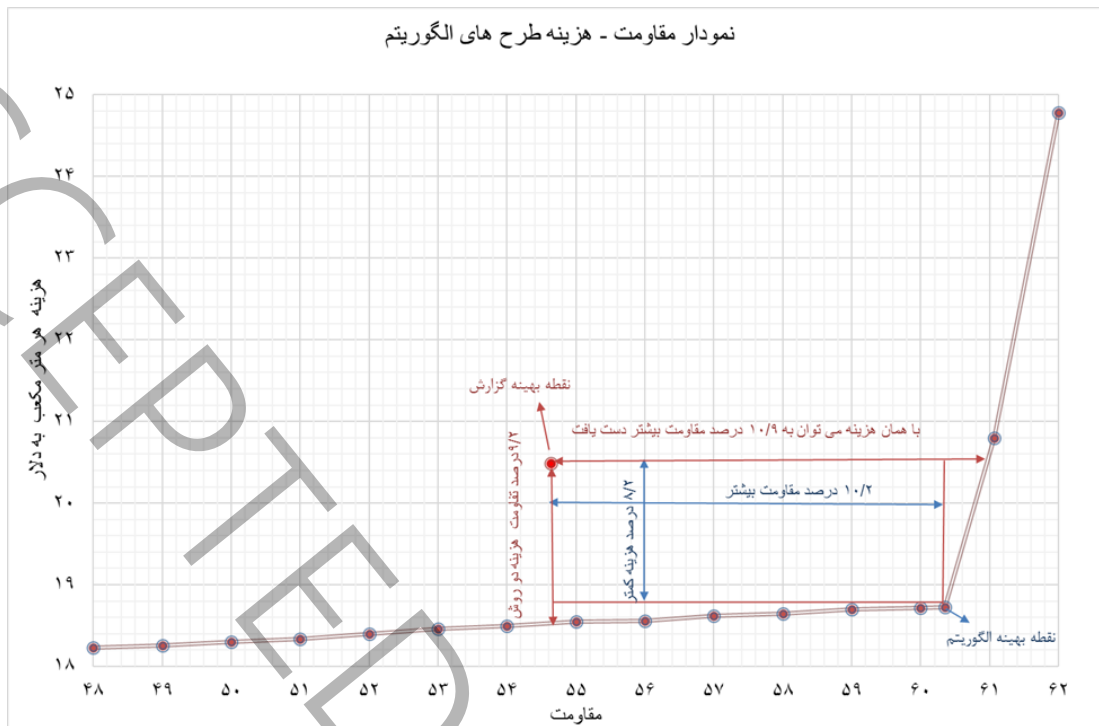
۴- نتایج و تحلیل آنها

۴-۱- توانمندی الگوریتم در دست‌یابی به طرح مخلوط‌های بهینه الگوریتم به این دلیل که تابع را با عددگذاری بهینه می‌کند، علاوه بر یافتن بهترین طرح مخلوط ممکن برای داده‌های پایه، توانایی یافتن طرح مخلوط بهینه برای یک مقاومت خاص را نیز دارد، در حالی که در بهینه‌سازی عددی، فقط یک پاسخ به عنوان طرح بهینه داده می‌شود. به عبارت دیگر در الگوریتم، مقاومت هدف می‌تواند جزو داده‌های مساله باشد و طرح مخلوط و قیمت را موازنه نماید.

در شکل (۴) که برگرفته از اطلاعات جدول (۱۰) می باشد، خروجی های الگوریتم در نمودار بهینه سازی مقاومت- قیمت ترسیم شده است. براساس این شکل، باتوجه به قیمت اعمال شده مصالح، سه شیب متفاوت در نمودار حاصل شد که اولی تا ۵۴ مگاپاسکال و دومی تا نقطه

بهینه نمودار یعنی ۶۰/۳ مگاپاسکال و سومی تا آخرین خروجی امکان پذیر با اعمال محدودیت اولیه در نظر گرفته شده برای مصالح یعنی ۶۲ مگاپاسکال است. از ۵۴ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال شیب نمودار بسیار ملایم و تغییرات قیمت نسبت به مقاومت کم است.

شماره طرح	شماره ساخت	آب (kg)	سیمان (kg)	میکروسیلیس (kg)	فوق روان کننده (kg)	درشتدانه (kg)	ریزدانه (kg)	اسلامپ طرح (mm)	اسلامپ نمونه (mm)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح Str (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه	درصد اختلاف مقاومت فشاری طرح با نمونه
۱۶۳	۲۰	۱۵۶/۶	۴۱۹/۰۱۶	۳۵/۱۴۵	۷/۰۳۵	۱۱۰۴/۸۴	۶۳۴	۹۵	۹۰	۶۰/۸	۵۸/۵۴	-۳/۷
۷۱	۵	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵	۵۷	۶۱	۵۵/۲	۵۵/۹	+۱/۲



شکل ۴- نمودار مقاومت- هزینه پاسخ‌های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Figure 4. The cost-strength relationship of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm

بررسی می‌شود. نظر به اینکه فرآیند الگوریتم‌ها براساس انتخاب تصادفی است و الگوریتم یکی از جواب‌های بهینه را پیشنهاد می‌دهد، لذا تغییرات اندک در روند صعودی یا نزولی نمودار انتخاب مصالح قابل انتظار است.

۴-۳-۱- بررسی نحوه انتخاب مقدار آب

میزان آب برای ساخت طرح مخلوط داده‌های پایه، بین ۱۶۰ تا ۱۸۵ و برای الگوریتم فراابتکاری ۱۵۰ تا ۱۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب در نظر گرفته شد. طبق شکل (۵)، انتخاب میزان آب در داده‌های آزمایشگاهی از ترتیب خاصی پیروی نمی‌کند و با رشد مقدار مقاومت گاهی بیش‌تر و گاهی کم‌ترین حد تعریف شده آن که ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده انتخاب شده است؛ این در حالی است که برای رسیدن به مقاومت بالاتر میزان آب به تدریج باید کم‌تر شود. این کاهش، در نمودار میزان آب طرح مخلوط داده شده با استفاده از الگوریتم کاملاً رعایت شده است. الگوریتم تا مقاومت ۵۱ مگاپاسکال نزدیک به ۱۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب را پیشنهاد داده تا علاوه بر دستیابی به مقاومت هدف، با استفاده بیش‌تر از مصالح با قیمت کم‌تر، قیمت بتن را کاهش داده باشد و برای مقاومت بالاتر یعنی تا ۶۰ مگاپاسکال، میزان آب را به حداقل

۴-۲- نتایج آزمایشگاهی طرح‌ها

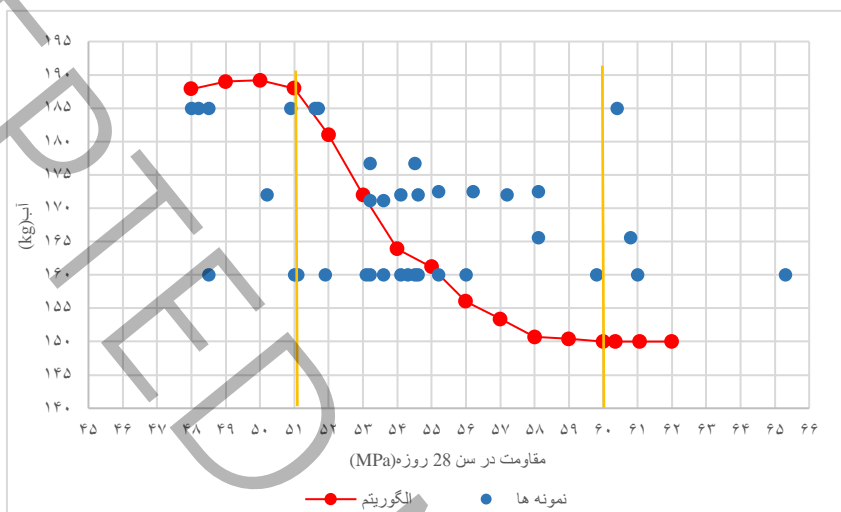
ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه نشان از میانگین تحقق بیش از ۹۷٪ طرح مخلوط‌های منتخب الگوریتم را داشت و برای طرح بهینه گزارش مرجع نیز تقریباً به همین صورت بود، هرچند درصد خطایی نیز به دلیل تغییر شرایط کارگاهی داده‌های گزارش مرجع با شرایط کارگاهی تحقیق حاضر که تقریباً ۲/۴۵٪ به دست آمد، نیز وجود دارد.

۴-۳- تحلیل انتخاب نسبت‌ها در طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا

تغییر نسبت مصالح در طرح مخلوط بر خواص مکانیکی بتن تاثیرگذار است. باتوجه به اینکه در این تحقیق بهینه‌سازی بین مقاومت و قیمت صورت گرفته است، لذا انتظار می‌رود تا الگوریتم با در نظر گرفتن تابع طرح مخلوط و قیمت مصالح، نسبت به انتخاب اقتصادی مصالح برای دستیابی به مقاومت هدف دقت عمل به خرج داده باشد. در این بخش ضمن بررسی تاثیر تغییر نسبت مصالح بر مقاومت سن ۲۸ روزه این نوع بتن برای داده‌های آزمایشگاهی که انتخاب مقدار مصالح در آن تجربی و از نظر ترتیب گسسته بودند، با توجه به پاسخ‌های درج شده در جدول (۱۱)، کارایی الگوریتم ژنتیک فراابتکاری نیز برای انتخاب مصالح

تعریف شده در برنامه خود یعنی ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش داده و برای مقاومت بالاتر از آن نیز همین مقدار را حفظ کرده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که تصمیم‌گیری الگوریتم که بر اساس فرایند برنامه‌نویسی و تابع طرح مخلوط است با واقعیت همخوانی داشته و میزان آب طرح مخلوط‌ها را مناسب تشخیص داده است، درحالی که برای

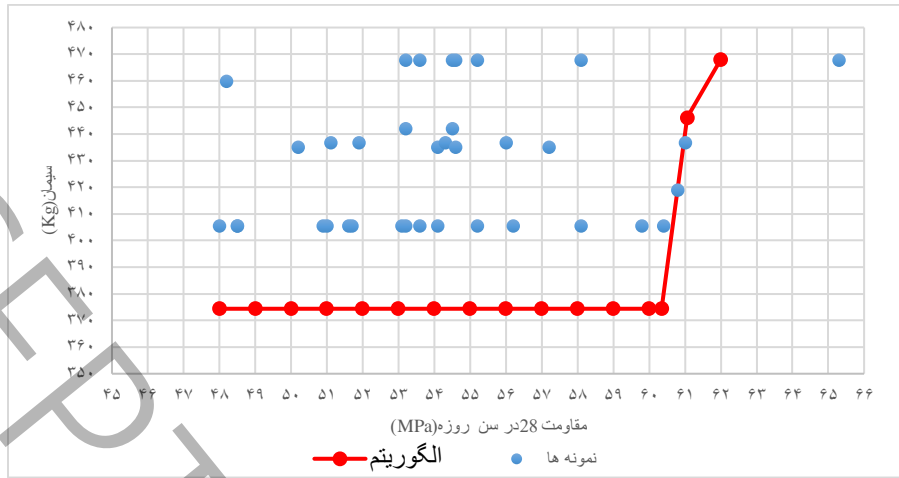
انتخاب‌های آزمایشگاهی این منطق رعایت نشده است. به‌عنوان مثال برای داده‌های آزمایشگاهی در محدوده ۵۴ تا ۵۵ مگاپاسکال ۷ طرح مخلوط با وزن‌های متفاوت برای آب در نمودار دیده می‌شود که بعضی دارای تفاوت زیادی هستند، درحالی که برای نمودار الگوریتم به‌صورت یک خط کاهشی نمایش داده شده است.



شکل ۵- نمودار مقاومت- مقدار آب پاسخ‌های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی
Figure 5. Weight ratios of Simon's laboratory mixture design (Kg/m³) [44]

الگوریتم، می‌توان با مقدار کمتری سیمان به مقاومت‌های مورد نظر رسید. در ادامه الگوریتم برای مقاومت‌های بالاتر، براساس تابع مقاومت، مقدار سیمان طرح بیش‌تری را انتخاب کرده است و سیر صعودی استفاده از سیمان تقریباً مشابه سیر صعودی منحنی مقاومت- قیمت در شکل (۴) است که یکی از علل آن تغییر ناگهانی نیز همین افزایش مقدار سیمان از ۶۰/۳ تا ۶۲ مگاپاسکال می‌باشد. مقدار سیمان داده‌های آزمایشگاهی در محدوده ۵۴ تا ۵۵ مگاپاسکال پراکنده بوده درحالی که برای الگوریتم سیر تغییرات یک خط افقی است.

۲-۳-۴- بررسی نحوه انتخاب مقدار سیمان
مقدار سیمان طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی بین ۴۰۵/۶ تا ۴۶۸ و برای الگوریتم از ۳۷۴/۵ تا ۴۹۹/۲ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شده است. در ساخت نمونه‌های مرجع نسبت‌ها متفاوت بوده و روند قابل بحث و بررسی را طی نکرده است. مطابق شکل (۶) در الگوریتم با توجه به اینکه سیمان یکی از مصالح گران بتن است، برای مقاومت ۴۸ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال، پایین‌ترین حد ممکن یعنی ۳۷۴/۵ کیلوگرم در مترمکعب را انتخاب نموده است؛ این موضوع نشان می‌دهد که بر اساس روش کار



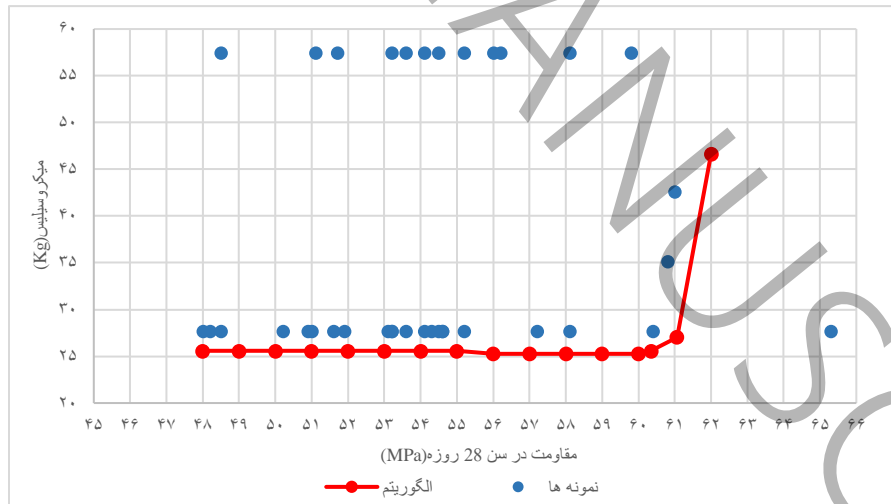
شکل ۶- نمودار مقاومت - مقدار سیمان پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

Figure 6. Coefficients of compressive strength function of meta-heuristic genetic algorithm

(۷) مشخص است اتفاق نمی افتد. برای الگوریتم اما نحوه انتخاب متفاوت است و تا مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال میزان میکروسیلیس را در پایین ترین حد ممکن نگه داشته و سعی در افزایش مقاومت بر اساس تغییر در مقادیر دیگر مصالح داشته است همانطور که در نمودار مقاومت-قیمت اتفاق افتاده بود. به این ترتیب هم مقدار مقاومت بیش تر شده و هم اضافه قیمتی از بابت افزایش مقدار میکروسیلیس به طرح اضافه نشده است.

۴-۳-۳- بررسی نحوه انتخاب مقدار میکروسیلیس

میزان میکروسیلیس در نمونه های آزمایشگاهی ۲۷/۶۹ تا ۵۷/۵۱ و برای الگوریتم ۲۵/۲۶ تا ۵۹/۶۴ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شده است. با توجه به قیمت بالاتر میکرو سیلیس نسبت به سیمان، در انتخاب میزان آن برای طرح مخلوط باید دقت عمل بیشتری صورت گیرد در حالی که معمولا در ساخت نمونه های آزمایشگاهی از آنجا که تصمیم گیری برای مقدار آنها در طرح مخلوط تجربی است، این عمل همانگونه که در نمودار



شکل ۷- نمودار مقاومت - مقدار میکروسیلیس پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

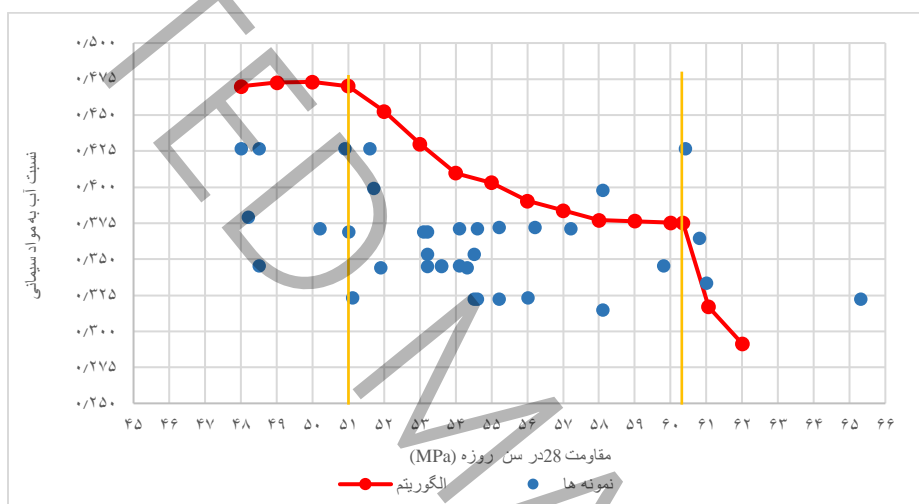
Figure 7. The relationship between the amount of microsilica and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data

معمولا در استانداردهای طرح مخلوط، طراحی را از نسبت آب به سیمان شروع کرده و سپس مقدار آب و سیمان را تعیین می کنند. مطابق شکل

۴-۳-۴- بررسی نسبت آب به مواد سیمانی

تحقیقات پژوهشگران که کاهش میزان این نسبت را برای افزایش مقاومت ضروری می‌دانند منطبق است. در پاسخ‌های الگوریتم تا مقاومت ۵۱ مگاپاسکال تقریباً این نسبت به دلیل ثبات تقریبی سه مصالح فوق ثابت و بعد از آن تا مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال به دلیل کاهش میزان آب اختلاط، سیر نزولی تقریباً یکنواختی پیدا می‌کند و این تغییرات تا ۶۲ مگاپاسکال که میزان سیمان و میکروسیلیس بیشتر می‌شود، شدت بیش‌تری می‌گیرد. به‌عنوان مثال در مقطع ۵۴ تا ۵۵ مگاپاسکال نسبت آب به مواد سیمانی تقریباً در سه سطح پراکنده هستند در حالیکه برای الگوریتم بصورت یک خط نزولی نمایش داده شده است.

(۸) در داده‌های پایه، نظمی در نسبت آب به مواد سیمانی با مقاومت مشهود نیست و مشخص است که طراحی نمونه‌ها نیز براساس این نسبت نبوده است. در برنامه اجرایی الگوریتم نیز انتخاب مقدار مصالح براساس نسبت مذکور نبوده اما این نسبت به عنوان یک محدودیت در فرآیند تصمیم‌گیری دخالت داشته به این ترتیب که از نظر الگوریتم طرح مخلوط‌های با نسبت زیر ۰/۲۷ مورد قبول نبوده و آنها را تغییر داده است. نکته جالب‌تر اینکه در بهینه‌سازی الگوریتم، آب، سیمان و میکروسیلیس در طرح بررسی و انتخاب شده اما با توجه به نظم حاکم بر انتخاب مقدار این سه ماده، سیر تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی نیز منظم و با

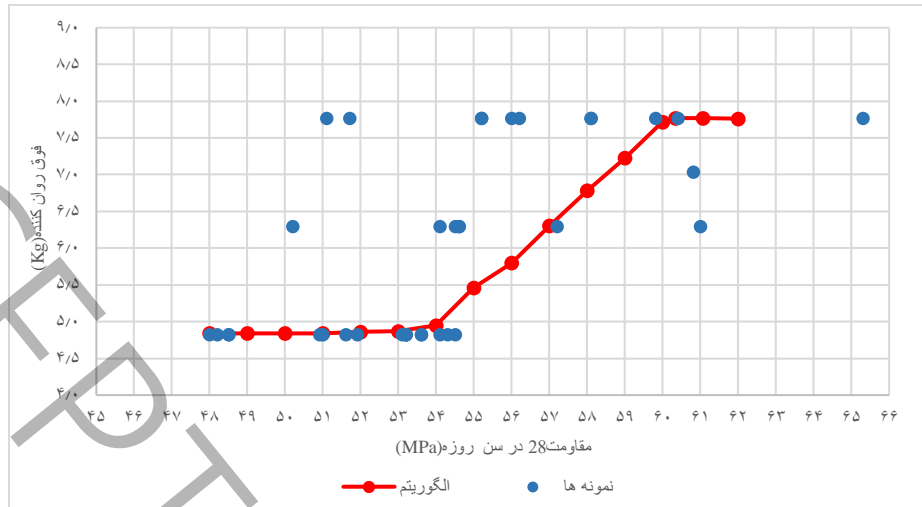


شکل ۸- نمودار نسبت آب به مواد سیمانی - مقاومت پاسخ‌های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی

Figure 8. The relationship between the ratio of water to cement materials and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and experimental data

مگاپاسکال این مقدار تقریباً ثابت است اما سیر تغییرات آن منظم بوده و از آن رده به بعد، سیر صعودی را طی می‌کند تا در ۶۰/۳ مگاپاسکال به سقف انتخاب یعنی ۷/۷۷ کیلوگرم در متر مکعب برسد و پس از آن نیز تقریباً همین مقدار را انتخاب نمود. در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی نظمی مشخص نیست. مثال واضح آن در محدوده ۵۴ تا ۵۵ مگاپاسکال است که دو سطح فوق روان‌کننده در داده‌های آزمایشگاهی به کار رفته و در الگوریتم یک خط صعودی نمایانگر انتخاب است.

۴-۳-۵- بررسی نحوه انتخاب میزان فوق روان‌کننده
دامنه انتخاب میزان فوق روان‌کننده برای هردو روش ۴/۸۳ تا ۷/۷۷ انتخاب شد، اما از آنجا که محدودیت اسلامپ حداقل ۸۰ میلی‌متر برای الگوریتم تعیین شده و نسبت آب به مواد سیمانی نیز عامل دیگری بود تا به جای آب از فوق روان‌کننده استفاده شود، همانگونه که در شکل (۹) نمایان است، الگوریتم برای مقاومت‌های پایین‌تر، کمترین میزان روان‌کننده در مترمکعب را پیشنهاد داده است و تا مقاومت ۵۴



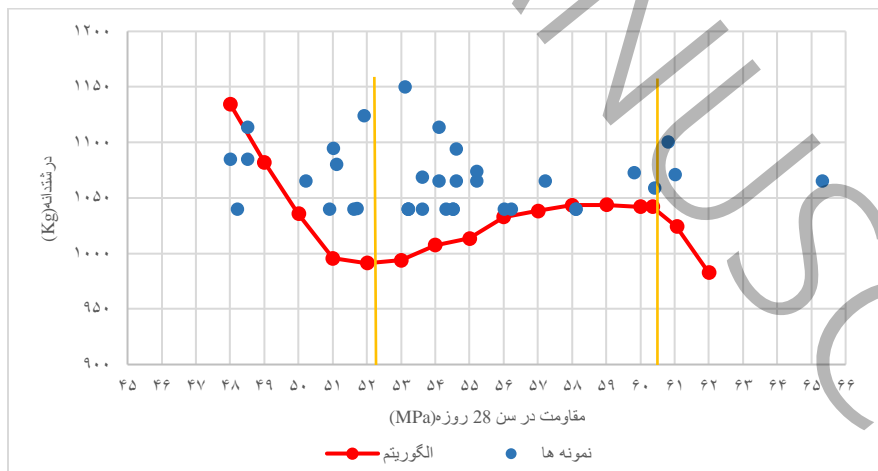
شکل ۹- نمودار مقاومت- مقدار فوق روان کننده پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

The relationship between the amount of superplasticizer and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data

بعد از آن تا مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال، الگوریتم برای تامین مقاومت مورد نظر مقدار آب طرح مخلوط را کاهش و مقدار درشت دانه را افزایش داده است. در همین مقطع تغییرات ریزدانه کاهشی ولی با مقدار کم است و کاهش اندک آن را می توان بر اساس تابع مقاومت، افزایش میزان فوق روان کننده دانست. در مقاومت بالاتر الگوریتم مجدداً میزان درشت دانه را کاهش و ریزدانه را کمی افزایش داده و به جای مابقی کاهش در درشت دانه، سیمان و میکروسیلیس اضافه کرده است.

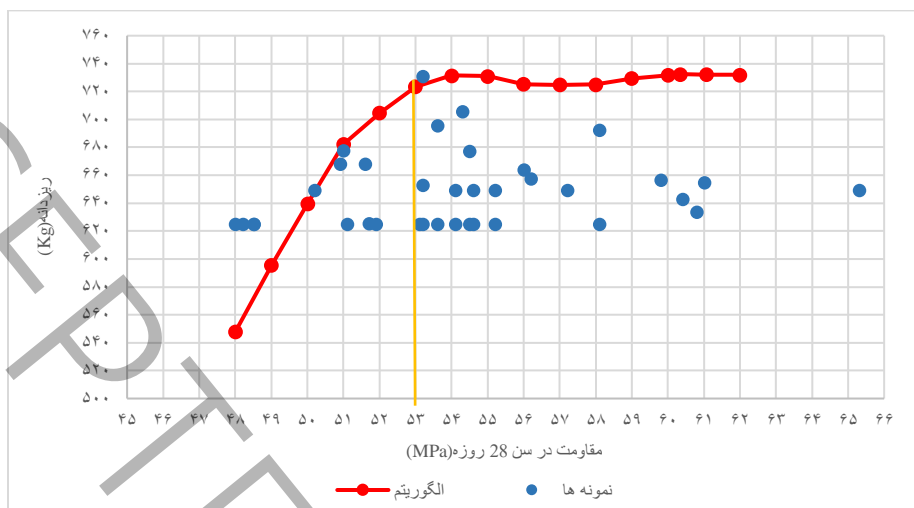
۴-۳-۶- بررسی نحوه تاثیر انتخاب میزان سنگدانه ها

با توجه به اینکه بعد از آب ارزان ترین مصالح سنگدانه است، لذا الگوریتم در انتخاب میزان سنگدانه به حدود تعریف شده نزدیک شده اما به آن ها نرسیده است. به عبارتی مصالح دیگر تعیین کننده بوده و در مرحله بعد بین ریزدانه و درشت دانه انتخاب صورت گرفته است. مطابق شکل های (۱۰-۱۲) الگوریتم برای افزایش مقاومت تا ۵۲ مگاپاسکال مقدار درشت دانه کاهش داده و میزان ریزدانه تا ۵۳ مگاپاسکال افزایش یافته تا صرفاً با تغییر در اندازه سنگدانه بتوان مقاومت را افزایش داد.



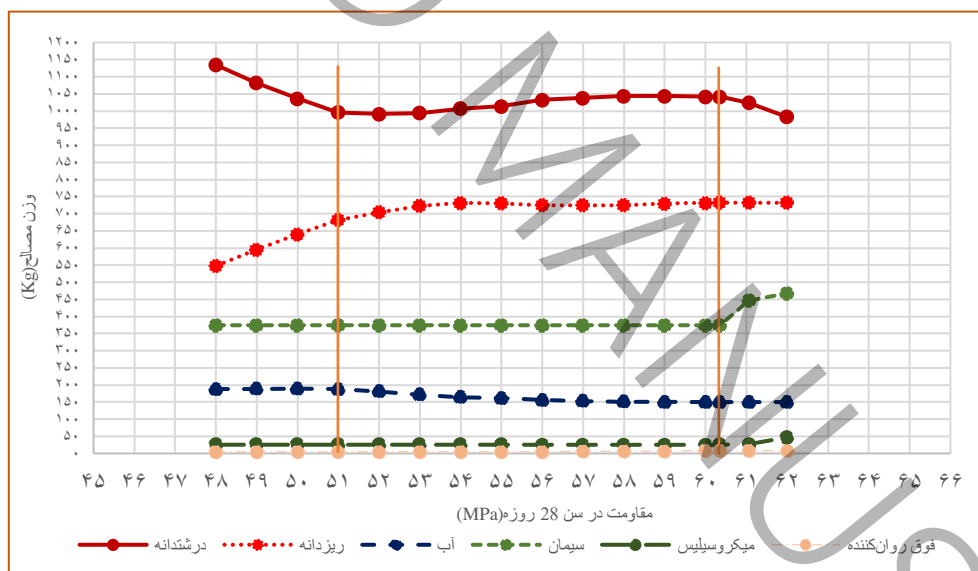
شکل ۱۰- نمودار مقاومت- مقدار درشت دانه پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

The relationship between the amount of coarse aggregates and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data



شکل ۱۱- نمودار مقاومت- مقدار ریزدانه پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

The relationship between the amount of fine aggregates and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data



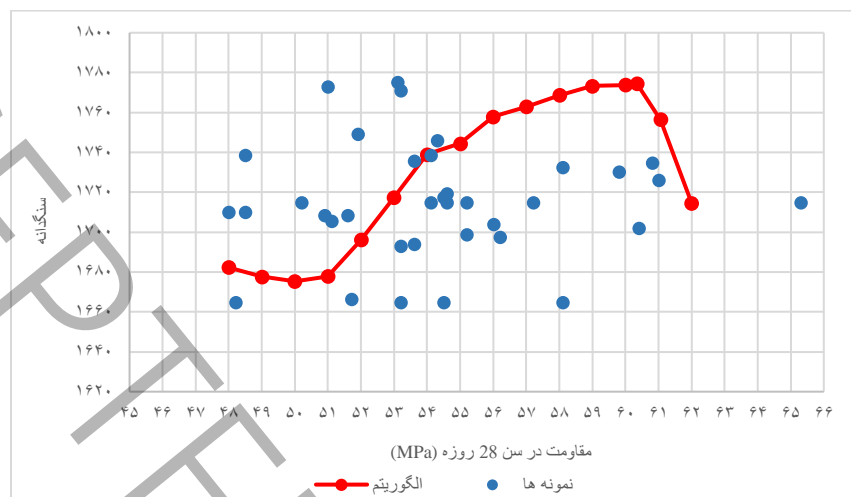
شکل ۱۲- نمودار مقاومت - جزئیات طرح مخلوط پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

The relationship between the details of the mix design and concrete strength in the optimal responses of the meta-heuristic genetic algorithm

یافته است. رفتار درشتدانه در شکل (۱۳)، برعکس رفتار آب در شکل (۵) به ازای تغییر مقاومت است؛ به عبارت دیگر الگوریتم به طور

شکل (۱۳) مقدار سنگدانه در طرح مخلوط های الگوریتم را نشان می دهد که تغییرات کلی سنگدانه ها تا ۵۱ مگاپاسکال جزئی و قابل اغماض است، ولی از ۵۱ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال میزان سنگدانه طرح مخلوط ها افزایش

کلی برای افزایش مقاومت فشاری، از مقدار آب طرح‌ها کم و به جای آن سنگدانه را اضافه کرده است.



شکل ۱۳- نمودار مقاومت- مقدار سنگدانه پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی

The relationship between the amount of aggregates and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data

سعی و خطا به ترتیب روند زیر را اجراء نمود تا هم هدف حاصل شود و هم اینکه هدف با کمترین هزینه به دست آمده باشد.

۱- الگوریتم برای افزایش مقاومت در رده‌های پایین، جایگزینی درشت‌دانه با ریزدانه را انجام داده لذا تا رده مقاومت ۵۱ مگاپاسکال، صرفاً تغییر در اندازه سنگدانه‌ها از درشت‌دانه به ریزدانه را پیشنهاد داده است به این معنی که با هزینه کمی می‌توان مقاومت را افزایش داد.

۲- برای دستیابی به مقاومت بالاتر، الگوریتم ژنتیک کاستن از مقدار آب را بهترین روش دانسته است، پس برای افزایش مقاومت از ۵۱ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال که نقطه بهینه مقاومت- هزینه برای این نوع مصالح است، مقدار آب طرح مخلوط را کم کرده است تا با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت افزایش یابد و به جای آن از سنگدانه درشت که ارزان‌ترین مصالح بعد از آب است، استفاده نموده و از این طریق مقاومت سنگدانه نیز به طرح کمک می‌کند.

۳- برای رسیدن به مقاومت بالاتر از ۶۰/۳ مگاپاسکال، افزایش مقدار سیمان و میکروسیلیس الزامی است و الگوریتم با تغییر در این مقادیر با اولویت افزایش سیمان به دلیل ارزان‌تر بودن نسبت به میکروسیلیس اقدام کرده و برای رعایت حد نصاب حجم طرح مخلوط، از مقدار درشت‌دانه که در مرحله قبل نقش پرکننده داشت، کاسته است.

۵- نتایج

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اولیه از مصالح بتن با مقاومت بالا و با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری مقدار مصالح را برای رسیدن به مقاومت هدف، بر اساس تابع طرح مخلوط انتخاب می‌کند و آن را همواره به عنوان ورودی عددی یک تابع در نظر می‌گیرد، می‌توان گفت که، این الگوریتم توانمندی بالایی در بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا با لحاظ قیمت مصالح دارد. به این ترتیب می‌توان برای یک رده مقاومت، طرح مخلوط خاص همان رده را داشت، با این مزیت که قیمت مصالح در آن بهینه شده باشد. برای این کار، الگوریتم ابتدا سعی کرده تا با تغییر در مقدار مصالح ارزان‌تر هدف را تامین کرده و در مراحل بعد مقدار مصالح گران‌تر را افزایش داده است. بهترین نقطه از نظر داشتن بیش‌ترین مقاومت ممکن و هزینه اقتصادی بهینه، برای داده‌های آزمایشگاهی مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال با هزینه ۱۸/۷۳ دلار و با اسلامپ ۱۳۴ میلی‌متر بدست آمد. این طرح در مقایسه با طرح بهینه معرفی شده در گزارش مرجع با مقاومت ۵۴/۷ مگاپاسکال، دارای ۱۰/۲ درصد مقاومت بالاتر و هزینه‌ای به میزان ۸/۲ درصد پایین‌تر بود. از آنجا که ساخت چند طرح مخلوط پیشنهادی الگوریتم با تقریب بالای ۹۷٪ محقق شد، پس می‌توان طرح‌های الگوریتم را اجرایی دانست و برای افزایش مقاومت بتن با در دست داشتن یک نوع مصالح ثابت، به جای

که مقدار سیمان و میکروسیلیس اضافه شده، الگوریتم مقدار فوق روان کننده را نیز بیش تر نموده است.

۴- از مقطعی که مقدار آب طرح مخلوط کم شده است، فوق روان کننده به عنوان یک افزودنی برای حفظ روانی بتن اضافه شده و برای مقطعی

مراجع

- [1] S.H. Ahmad, S.P. Shah, High Performance Concrete and Application, McGraw-Hill (TX), (1994).
- [2] FIP/CEB, High strength concrete, State of the art report, Bulletin d'information, 197 (1990).
- [3] S. Mindes, J. F. Young, Concrete Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey USA, 530 (1981).
- [4] T. V. N Narques, R. C. Carvalho, A. Christoforo, F. J. R. Mascarenhas, F.N. Arroyo, F. C. Bomfim Junior, H. Fd. Santos, Use of Real Coded Genetic Algorithm as a Pre-Dimensioning Tool for Prestressed Concrete Beams, Buildings, 13(2023), <https://doi.org/10.3390/buildings13030819>.
- [5] S. Han, L. Xiao, An improved adaptive genetic algorithm. SHS Web of Conferences 140, (2022), <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214001044>
- [6] A.A. Shirzadi Javid, H. Naseri, M.A. Eatbari Ghasebeh, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45(2021)913–927, <https://link.springer.com/article/10.1007/s40996-020-00352-6>.
- [7] P. Kondapally, A. Chepuri, V.P. Elluri, B. S. K. Reddy, Optimization of concrete mix design using genetic algorithms, Earth and Environmental Science, (2022) Doi:10.1088/1755-1315/1086/1/012061
- [8] R. K. Tipu, V. R. Panchal, K. S. Pandya, Multi-objective optimized high-strength concrete mix design using a hybrid machine learning and metaheuristic algorithm, Asian Journal of Civil Engineering volume 24 (2023) 849–867.
- [9] K.R. Wu, B. Chen, W. Yao, D. Zhang, Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 31(10) (2001) 1421–1425.
- [10] K.S. AL-Jabri, A.H. AL-Saidy, R. Taha, A.J. AL-Kemyany, Effect of using Wastewater on the Properties of High Strength Concrete, Procedia Engineering, 14 (2011) 370–376.
- [11] A. Shamsai, K. Rahmani, S. Peroti, L. Rahemi, the Effect of Water-Cement Ratio in Compressive and Abrasion Strength of the Nano Silica Concretes, World Applied Sciences Journal, 17(4)(2012) 540-545.
- [12] A. Behnood, H. Ziari, Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement & Concrete Composites. 30 (2008) 106–112.
- [13] M. Mazloom, A.A. Ramezani pour, J.J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, Cement & Concrete Composites, 26(4) (2004) 347–357.
- [14] M.A. Safin, Compressive Sterength of Portland cement pastes and mortar containing CU-ZN nano-frite, International Journal of Nano Dimention, 3(2) (2012) 91-100.
- [15] P.N. Balaguru, Nanotechnology and concrete, Opportunities and challenges proceeding of the international conference- application of technology in concrete design. Scotland. UK, (2005) 113-122
- [16] M.J. Shanang, High strength concrete containing natural Pozzolan and Silica Fume, Cement & Concrete Composites, 22(6) (2000) 399-406.
- [17] M. Amin, K. Abu el-hassan, Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete, Construction and Building Material, 80(1) (2015) 116-124.
- [18] R. Kishore, V. Bhikshma, P.J. Prakash, Study on Strength Characteristics of High Strength Rice Husk Ash Concrete, The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 14 (2011) 2666–2672.
- [19] R. Rathan Raja, E.B. Perumal Pillaib, A.R. Santhakumar, Evaluation and mix design for ternary blended high strength concrete, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference. (NUiCONE 2012). 51 (2013) 65 – 74.
- [20] V. Cernya, M. Kocianovaa, R. Drochytkaa, Possibilities of lightweight high strength concrete production from sintered fly ash aggregate, 18th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings. (CRRB2016). 195 (2017) 9 – 16.
- [21] J.M. Khatib, P.S. Mangat, In-uence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste. Cement & Concrete Composites. 21 (1999) 431-437.
- [22] B. Łazniewska-Piekarczyk, J. Szwabowski, Influence of the Type of Anti-Foaming Admixture and Superplasticizer on the Properties of Self-Compacting

Mortar and Concrete, *Journal of Civil Engineering And Management*, 18(3) (2012) 408–415.

[23] S. Alsadey, Influence of Superplasticizer on Strength of Concrete, *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 1(3) (2012).

[24] A.M. Mansor, R. P. Borg, A. M. M. Hamed, M. M. Gadeem, M. M. Saeed, The effects of water-cement ratio and chemical admixtures on the workability of concrete, *Materials Science and Engineering*. 442 (2018) 012017 doi:10.1088/1757-899X/442/1/012017

[25] T. Ozturan, C. Cecen, Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths, *Cement and Concrete Research*, 27(2) (1997) 165–170.

[26] P.C. Aitcin, P.K. Mehta, Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete. *ACI Material journal*, American Concrete Institute Detroit. 87(2) (1990) 03–107.

[27] H. Beshr, A.A. Almusallam, M. Maslehuddin, Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*. 17(2) (2003) 97–103.

[28] A. Kılıc, C.D. Atis, A. Teymen, O. Karahan, F. O'zcan, C. Bilim, M. O'zdemir, The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete, *Cement & Concrete Composites*, 30(4) (2008) 290–296.

[29] M. Masihi, N. Shahsavari-pour, A.K. Abbasi, Optimization of the Multi-Mode Resource Constrained Time –Cost Trade off Project Scheduling Problem by using Modified Genetic Algorithm. MD thesis, Ahwaz Islamic Azad University. Chapter2. (2012). (In Persian).

[30] F. Rosenblatt, 1957. The Perceptron a perceiving and recognizing automaton, Cornell Aeronautical Laboratory. Report 85-460-1.

[31] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (1975).

[32] M. Dorigo, *Optimization Learning and natural algorithms*. PhD Thesis, Dip Electronica information, Politecnico di Milan. Italy. (1992).

[33] J. Kennedy, R. Eberhart, A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, In the Sixth International Symposium on Micro-Machine and Human Sciences. (1992) 43-39.

[34] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. (2007) 4661-4667.

[35] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, *American Association for the Advancement of Science*, 220(4598) (1983) 671-680.

[36] K. Von Frisch, *the Dance Language and Orientation of Bees*, Harvard University Press Cambridge. MA US: Harvard University Press. (1967).

[37] H. Shah-Hosseini, Problem solving by intelligent water drops, *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. (2009) 3226-3231.

[38] S.Hr. Aghay Kaboli, J. Selvaraj, N.A. Rahim, Rain-fall optimization algorithm: a population-based algorithm for solving constrained optimization problems, *Journal of Computational Science*, 19 (2017)31-42.

[39] F. Sajedi F, H. Abdul-Razak, Relationship between 7- and 28-days CS for HSC by use of ANN and regression methods, *Asian Journal of Civil Engineering (AJCE)*, Iran. 11(2) (2010) 207-218.

[40] A. Guerra, P.D. Kioussis, Design optimization of reinforced concrete structures, *Computers and Concrete*, 3(5) (2006) 313-334.

[41] P. Chopra, R. Kumar Sharma, M. Kumar, Prediction of Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Network and Genetic Programming. Hindawi Publishing Corporation, (2016), Article ID 7648467, 10 pages.

[42] M. Masihi, N. Shahsavari Pour, H. Daneshvar, M. Veissii, Optimization of the Multi-Mode Resource – Constrained Time –Cost Trade off Project Scheduling Problem by using Modified Genetic Algorithm, *Indian Journal of Natural Sciences*. 5(30) (2015) 6798-6811.

[43] A. Hghighi A. Ahmadi-Najl, Simultaneous Optimization of Operating Rules and Rule Curves for Multi reservoir Systems Using a Self-Adaptive Simulation-GA Model, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(10) (2016) 1943-5452.

[44] M.J. Simon, 2003. Concrete Mixture Optimization Using Statistical Methods, Final Report. FHWA-RD-03-060, Grant No. DTFH61-97-Y-30033.

ACCEPTED MANUSCRIPT