



## پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های معمولی، حاوی خاکستر بادی و سرباره بر اساس روش‌های نوین و ارائه طرح مخلوط‌های بهینه آن‌ها

مهرداد احسانی<sup>۱</sup>، حامد ناصری<sup>۱</sup>، روح‌الله سعیدی نژاد<sup>۲</sup>، محمدعلی اعتباری قصبه<sup>۱</sup>، فریدون مقدس نژاد<sup>۱\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران  
۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۲  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۳۰  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴

### کلمات کلیدی:

پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن  
بهینه‌سازی طرح مخلوط  
یادگیری ماشین  
رگرسیون  
الگوریتم‌های فراابتکاری

**خلاصه:** در این مطالعه، چهار دسته بتن شامل خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره، بتن معمولی و بتن حاوی سرباره مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از دو روش یادگیری ماشین معرفی شده (الگوریتم ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال) و چهار روش رگرسیونی، مقاومت فشاری بتن‌های مذکور پیش‌بینی شده است. با استفاده از شاخص‌های آماری دقت هر مدل برآورد شده و با دقت‌ترین مدل برای هر دسته بتن معرفی شده است و از آن برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شد. روش یادگیری ماشین مبتنی بر رقابت لیگ فوتبال برای هر چهار دسته بتن به جز بتن معمولی از دقت بالاتری برخوردار بود و برای بتن معمولی روش یادگیری ماشین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به عنوان بهترین مدل معرفی گردید. هدف از مسئله بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه هر دسته بتن با در نظر گرفتن مقاومت بتن ۴۰ مگاپاسکالی بوده است. بتن حاوی خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره و همچنین بتن حاوی سرباره نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۳۵/۲، ۲۹/۹ و ۲۳/۱ درصد نسبت به بتن معمولی هزینه ساخت را کاهش می‌دهند. تولید سیمان یکی از عوامل آلودگی محیط زیست می‌باشد. بتن حاوی خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره، بتن حاوی سرباره و بتن معمولی به ترتیب ۲۱۷/۲۵، ۱۵۰/۴۷، ۱۰۲ و ۴۱۴/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان در طرح مخلوط بهینه مورد استفاده قرار گرفتند. که بتن شامل سرباره، کمترین مقدار مصرف سیمان برای بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال را در بین ۴ دسته بتن دارد و حدود ۷۵/۴ درصد نسبت به بتن معمولی مصرف سیمان را کاهش داده است.

### ۱- مقدمه

مصالح، انرژی و همچنین آلودگی محیط زیست می‌شود. بر اساس موارد ذکر شده در بالا باید با راهکارهای مختلف مصرف سیمان را به حداقل رساند تا به محیط زیست آسیب کمتری زده شود. یکی از راه‌حل‌های مناسب، استفاده از مواد جایگزین سیمان می‌باشد که باعث می‌شود این مواد بازیافتی در بتن مدفون شده و مصرف سیمان کمینه شود [۵] و [۴]. از یک جهت ویژگی‌های مطلوب بتن و از جهت دیگر ساخت آسان آن باعث شده بتن جایگاه خوبی در صنعت ساخت پیدا کند. مقاومت فشاری بتن در سن‌های مختلف از ویژگی‌های مکانیکی و پر اهمیت بتن است. بالا بودن مقاومت فشاری بتن، باعث شده که در پروژه‌های مختلف به صورت فراوان مورد استفاده قرار

بتن از سه قسمت اصلی آب، سیمان پرتلند و سنگدانه تشکیل می‌شود. سالانه حدوداً ۶/۱ میلیارد تن سیمان تولید می‌شود [۱]. سیمان به عنوان یکی از مواد مضر محیط زیست می‌باشد، که گاز کربن دی‌اکسید بسیار زیادی تولید می‌کند. حدود ۵ تا ۷ درصد گاز کربن دی‌اکسید منتشر شده در اتمسفر، به علت فعالیت‌های صنایع سیمان است [۳] و [۲]. برای تولید یک تن سیمان به حدود ۵/۱ تن مصالح، ۳۰۰۰ تا ۴۳۰۰ مگاژول سوخت‌های فسیلی و ۱۲۰ تا ۱۶۰ کیلووات برق نیاز است [۳]. کاهش مصرف سیمان در بتن باعث تقلیل مصرف

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

مختلف مانند بهینه‌سازی استفاده کرد. تکنیک‌های یادگیری ماشین به دلیل انعطاف‌پذیری آن‌ها در توصیف روابط پیچیده مانند پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن مورد توجه قرار گرفته است. در مدل دیگری بهنود<sup>۵</sup> و همکاران [۱۴] مقاومت فشاری بتن مسلح سیلیکافیوم دار را با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و گرگ خاکستری<sup>۶</sup> پیش‌بینی کردند و روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری را برای پیدا کردن یک شبکه عصبی مصنوعی بهینه مورد استفاده قرار دادند. اگر چه الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه عصبی نسبت به روش‌های رگرسیونی روش‌های با دقت‌تری هستند اما به دلیل عدم ارائه فرمول بین متغیرهای ورودی و خروجی کاربردی برای حل مسائل با دیدگاه مختلف نیستند. کیم<sup>۷</sup> و همکاران [۱۵] مدل میکروآنالیز اشعه ایکس<sup>۸</sup> و روش طبقه‌بندی جدید استفاده کردند و با تحلیل خواص ذرات خاکستر بادی، مقاومت فشاری بتن را پیش‌بینی کردند. ناصری و همکاران [۱۶] با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری، مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی را پیش‌بینی کردند که با تحلیل نتایج به دست آمده مشخص گردید، مدل‌های ارائه شده از دقت خوبی برخوردار هستند. آن‌ها روش ارائه شده را تنها برای یک دسته بتن خاص مورد بررسی قرار دادند و بتن‌ها با ورودی‌های مختلف را در نظر نگرفتند.

در این مقاله پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن با روش‌های رقابت لیگ فوتبال، ژنتیک و انواع رگرسیون‌ها انجام شده است که می‌تواند مقاومت فشاری بتن‌های مختلف را پیش‌بینی کند. از این رو، داده‌های موجود به ۴ دسته بتن؛ معمولی، بتن حاوی خاکستر بادی، بتن حاوی روباره و بتن شامل خاکستر بادی و روباره طبقه‌بندی گردید. در این مقاله یک روش هرس کردن داده‌ها ابداع شد. مطابق این روش، داده‌هایی که خطای آزمایشگاهی دارند و یا با مدل سازگار نیستند حذف گردیده که باعث افزایش چشم‌گیر دقت مدل می‌شود. مزیت این روش پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در سن‌های مختلف است، که می‌تواند در سن‌های بالای بتن هم مقاومت فشاری را پیش‌بینی کند که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نهایت با یافتن مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری برای هر دسته، یک روش جدید برای یافتن طرح

گیرد [۶]. برای بهبود نقاط ضعف بتن از افزودنی‌هایی زیادی مانند سیلیکافیوم<sup>۱</sup>، خاکستر بادی<sup>۲</sup> و روباره آهن‌گذاری<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. در بتن اگر تا ۵۰ درصد به جای سیمان از خاکستر بادی و سرباره استفاده شود از نظر دوام، عملکرد بهتری نسبت به بتن معمولی دارد و از نظر حفظ منابع هم می‌تواند سودمند باشد [۱]. خاکستر بادی به عنوان یکی از مهم‌ترین افزودنی‌های مورد استفاده به جای سیمان (تا حدود ۵۰ درصد) در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است که از مزیت‌های آن می‌توان به نفوذپذیری کمتر، عملکرد مناسب در برابر پدیده کربناتاسیون، مقاومت در برابر سولفات، کلرید و نیز کنترل واکنش قلیایی سنگدانه‌ها اشاره کرد [۸ و ۷]. روباره آهن‌گذاری می‌تواند به جای سنگدانه در بتن مورد استفاده قرار گیرد که مقاومت فشاری را در طول زمان و در سن‌های زیاد افزایش می‌دهد [۹]. در صورت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف، گام بزرگی در تعیین یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن برداشته می‌شود، در غیر این صورت باید از روش‌های آزمایشگاهی استفاده کرد که می‌تواند مشکلات زیادی مانند هزینه بالا، نیاز به تعداد بالای نمونه، انرژی زیاد و آسیب زدن به محیط زیست داشته باشد. در نتیجه روش‌های سنتی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن مناسب نمی‌باشند. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. انواع رگرسیون و رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن و رسیدن به طرح اختلاط بهینه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. روش‌های رگرسیونی سنتی هستند و ممکن است برازش خوبی بر روی داده‌ها نداشته باشد و از دقت بالایی برخوردار نباشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز ابزاری برای پیش‌بینی خواص مکانیکی، عملکرد و دوام بتن می‌باشند. ازکان<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳] از شبکه مصنوعی و مدل منطبق فازی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بلند مدت بتن مسلح با سیلیکافیوم استفاده کردند. اگر چه مدل آن‌ها یک جایگزین مناسب برای روش‌های رگرسیونی و عددی بود، اما به علت استفاده از تعداد محدود داده، درجه عدم قطعیت را افزایش داده است. به علاوه این مدل آن‌ها، رابطه ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی را ارائه نمی‌دهد که بتوان از آن برای حل مسائل

5Behnood  
6Gery Wolves  
7 Kim  
8X-ray Microanalysis

1Silica fume  
2Fly ash  
3 Blast furnace slag  
4Ozcan

مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری) برای پیش بینی‌بینی مقاومت فشاری بتن، فرمول لگاریتم موجود است و لگاریتم صفر تعریف نشده می‌باشد، تمام داده‌ها بین ۰/۱ و ۰/۹ با استفاده از رابطه زیر مقیاس شدند.

$$S_i = 0.1 + (0.9 - 0.1) * \frac{i - i_{\min}}{i_{\max} - i_{\min}} \quad (1)$$

که در معادله ۱، مقدار  $i$  مقدار داده خام،  $i_{\min}$  و  $i_{\max}$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار موجود در داده‌ها می‌باشد.

با توجه به داده‌های موجود، اطلاعات مربوط به ۴ نوع بتن به طور خلاصه در جدول‌های ۴-۱ برای بتن‌های حاوی خاکستر بادی، بتن معمولی، بتن حاوی سرباره و بتن حاوی سرباره و خاکستر بادی به ترتیب قابل مشاهده است.

در جدول‌های ۴-۱، پارامتر خروجی برای هر جدول، مقاومت فشاری می‌باشد و بقیه پارامترها، پارامتر ورودی هستند.

معرفی روش رگرسیون برای پیش بینی مقاومت فشاری رگرسیون خطی

رابطه قوی بین متغیرهای ورودی و خروجی (مقاومت فشاری) نمایش داده شده در جدول‌های ۴-۱ وجود دارد، که متغیرهای ورودی به عنوان متغیر مستقل و مقاومت فشاری، متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. به این صورت رگرسیون خطی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i \quad (2)$$

که در آن  $x_i$  ها متغیرهای ورودی و  $B_i$  ها پارامترهای ثابت متغیرها می‌باشند و باید طوری تعیین شوند که معیار حداقل مربعات را ارضا کنند.  $B_0$  هم پارامتر ثابت مدل می‌باشد. در مورد پارامترهای ثابت باید به این نکته توجه کرد که هر چه مقدار یک پارامتر ثابت به عنوان مثال  $B_1$  بیشتر باشد، تاثیر متغیر مستقل مربوطه یعنی  $x_1$  بر متغیر وابسته بیشتر است. از طرفی علامت ضرایب ثابت نشان دهنده رابطه بین متغیر مستقل و وابسته می‌باشد که اگر مثبت باشد، رابطه مستقیم و اگر منفی باشد، رابطه عکس بین آن‌ها برقرار است [۱۰].

مخلوط بهینه از نظر مقاومت فشاری و هزینه ساخت، ارائه گردید.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق یکی از اهداف، ارائه دادن فرمول برای مقاومت فشاری بتن‌های مختلف است. خیلی از روش‌های مرسوم یادگیری ماشین فرمول ارائه نمی‌دهند و ابزارهای جعبه سیاه نامیده می‌شوند. یکی از روش‌های یادگیری ماشین که فرمول ارائه می‌دهند، رگرسیون‌ها هستند که دقت آن‌ها ایده‌آل نیست [۱۷]. از این رو دو روش جدید در این تحقیق معرفی و مورد استفاده قرار گرفتند.

در ابتدا با توجه به مواد مورد استفاده در بتن، داده‌ها به ۴ دسته تقسیم شدند. در مرحله بعد داده‌ها بین ۰/۱ و ۰/۹ مقیاس شده و سپس هرس گردیدند. مقاومت فشاری هر ۴ دسته داده، با استفاده از ۴ روش رگرسیونی (خطی، چند جمله‌ای درجه دو، لگاریتمی و نمایی) و ۲ روش فراابتکاری (ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال) پیش‌بینی شدند و برای هر دسته بتن به صورت جداگانه با دقت‌ترین فرمول انتخاب شده است. برای هر دسته بتن با استفاده از فرمول پیش‌بینی و در نظر گرفتن حداقل مقاومت فشاری که در آیین‌نامه مطرح شده است، هزینه ساخت را کمینه کرده و طرح مخلوط هر دسته گزارش شود.

۱۰۳۰ داده از مقالات معتبر بین‌المللی چاپ شده در دنیا استخراج شدند که در پیوست ضمیمه شدند و در این مقاله مورد استفاده قرار گرفتند [۱۱ و ۱۲] که از این بین ۲۳۲ داده مربوط به بتن معمولی، ۲۳۹ خط داده برای بتن حاوی خاکستر بادی، ۳۳۴ داده برای بتن شامل سرباره و سهم بتن حاوی سرباره و خاکستر بادی ۲۲۵ داده می‌باشد. پارامترهای سن بتن، سیمان، آب، سنگدانه ریز و درشت، فوق روان کننده بر اساس پلی‌ساکارید، مواد جایگزین سیمان و بعضی از نسبت‌های آن‌ها مانند آب به مواد چسباننده (سیمان و مواد جایگزین سیمان)، خاکستر بادی به مواد چسباننده، سرباره به مواد چسباننده، سنگدانه ریز به سنگدانه درشت در نظر گرفته شدند که بتوان مقاومت فشاری بتن را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرد.

از آنجایی که تعداد پارامترها زیاد و محدوده بین بیشینه و کمینه در هر متغیر ورودی اختلاف زیادی با متغیر ورودی دیگر دارد، بنابراین داده‌ها باید بین ۰ و ۱ مقیاس شوند. اما از آن جایی که در روش‌های مورد استفاده (رگرسیون لگاریتمی و روش‌های یادگیری ماشین

جدول ۱. مشخصات مربوط به بتن دارای خاکستر بادی  
Table 1. Characteristics of fly ash concrete

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر
۵۵/۲۳۵	۲۳۲/۵	۵۰۵	۱۳۴/۷	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۸/۰۹	۱۲۳/۳	۲۰۰/۱	۵۹	خاکستر بادی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۷/۵۱۵	۱۷۴/۵	۲۲۱/۴	۱۴۲	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۳/۳۱	۸/۸	۲۰	.	فوق روان کننده (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۰/۲۱	۹۹۷/۱	۱۰۹۸	۸۰۱	سنگدانه درشت (کیلوگرم بر متر مکعب)
۵۹/۶۰	۸۱۱/۴	۹۰۵/۹	۶۳۰	سنگدانه ریز (کیلوگرم بر متر مکعب)
۳۰/۶۹	۳۷/۲	۱۰۰	۳	سن (روز)
۰/۰۷	۰/۵	۰/۷	۰/۳	آب به مواد چسباننده
۰/۰۹	۰/۴	۰/۶	۰/۱	خاکستر بادی به مواد چسباننده
۰/۰۱	.	۰/۱	.	فوق روان کننده به مواد چسباننده
۰/۰۳	۰/۴	۰/۵	۰/۴	سنگدانه ریز به سنگدانه کل
۰/۴۳	۲/۹	۳/۸	۱/۶	سنگدانه درشت به مواد چسباننده
۱۳/۳۹	۳۱/۲	۶۶/۴	۸/۵	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

رگرسیون غیر خطی

رگرسیون‌های غیرخطی هم صادق می‌باشند.

روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری الگوریتم ژنتیک

رگرسیون غیرخطی انواع مختلفی دارد که می‌توان به مدل‌های چند جمله‌ای درجه دو، لگاریتمی، نمایی و توانی اشاره کرد که رگرسیون‌های غیرخطی مورد استفاده در این مقاله شامل چند جمله ای درجه دو، نمایی و لگاریتمی می‌باشد، که معادلات آن‌ها به شرح زیر است.

یکی از مرسوم‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های فرا ابتکاری می‌باشد که در سال ۱۹۷۶ توسط جان هالند<sup>۱</sup> ابداع شد. این الگوریتم برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح با پیچیدگی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]. در این الگوریتم چند عملگر وجود دارد که هر داده را یک کروموزوم در نظر می‌گیرد، که این کروموزوم از چند ژن تشکیل شده، که هر ژن یکی از ویژگی‌های مهم مسئله می‌باشد. در

که در جدول ۵،  $B_0$  پارامتر ثابت،  $B_i$  ها پارامتر ثابت متغیرها،  $n$  تعداد متغیرهای ورودی و  $x_i$  متغیر مستقل می‌باشد. موارد بیان شده در مورد تاثیر بیشتر متغیر مستقل بر وابسته و رابطه عکس بین متغیر وابسته و مستقل گفته شده در رگرسیون خطی برای

<sup>1</sup>Holland

جدول ۲. مشخصات مربوط به بتن معمولی

Table 2. Characteristics of ordinary Portland cement concrete

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر
۹۱/۸۹	۳۶۵/۷	۵۴۰	۲۰۰	(کیلوگرم بر متر سیمان مکعب)
۱۵/۱۶	۱۸۹/۵	۲۲۸	۱۴۰	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۴/۴۲	۱/۱	۲۸/۲	۰	فوق روان کننده (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۷/۵۴	۱۰۱۱/۲	۱۱۲۵	۸۰۱	سنگدانه درشت (کیلوگرم بر متر مکعب)
۸۲/۰۷۵	۷۷۴/۳	۹۴۵	۵۹۴	سنگدانه ریز (کیلوگرم بر متر مکعب)
۸۶/۷۶	۵۸/۸	۳۶۵	۱	سن (روز)
۰/۱۴	۰/۶	۰/۹	۰/۳	آب به مواد چسباننده
۰/۰۱	۰	۰/۱	۰	فوق روان کننده به مواد چسباننده
۰/۰۴	۰/۴	۰/۵	۰/۴	سنگدانه ریز به سنگدانه کل
۰/۷۹	۲/۹	۵/۶	۱/۶	سنگدانه درشت به مواد چسباننده
۱۶/۰۳	۳۲	۸۰	۶/۳	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

می‌باشد. در این الگوریتم ابتدا هر داده به یک بازیکن فوتبال تخصیص داده می‌شود، سپس بازیکن‌ها در بین تیم‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند که بازیکنان هر تیم بر اساس میزان تابع هدف به بازیکنان اصلی و ذخیره تقسیم می‌شوند. در این الگوریتم در هر تکرار، تیم‌ها با یکدیگر به رقابت پرداخته و تیمی که از لحاظ بازیکنان اصلی دارای قدرت بیشتری باشد، احتمال پیروزی بیشتری را دارد و در هر تکرار بازیکنان ذخیره در فضای شدنی با برداری به سمت بهترین بازیکن تیم خود حرکت می‌کنند. همچنین بازیکنان تیم برنده با یک بردار در ناحیه شدنی به سمت بهترین بازیکن لیگ (بهترین جواب یافته شده) در ناحیه‌ی شدنی و بهترین بازیکن تیم انتقال پیدا می‌کنند. پس از پایان هر لیگ، در هنگام نقل و انتقالات، بازیکنان در بین تیم‌های مختلف جابه‌جا می‌شوند و تیم‌هایی که عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند، شانس دریافت بهترین بازیکنان را دارند. عملکرد "سقوط" در این الگوریتم همانند عملکرد جهش در الگوریتم ژنتیک کار می‌کند. در

عملگر تکثیر، دو کروموزوم با یکدیگر ترکیب می‌گردند و داده جدید تولید می‌کنند. در عملگر جهش به صورت تصادفی یک یا بعضی از ژن‌های کروموزوم‌ها تغییر پیدا می‌کنند و دوباره جمعیت جدید تولید می‌شود. جمعیت جدید تولید شده ناشی از تکثیر و جهش با داده‌های اولیه مقایسه می‌شوند، بهترین داده‌ها باقی مانده و داده‌های ضعیف‌تر حذف می‌شوند. این عملیات به صورت مکرر ادامه پیدا می‌کند تا به یک معیار توقف برسیم که در این مقاله تعداد تکرار الگوریتم، معیار توقف در نظر گرفته شده است [۱۹].

#### الگوریتم رقابت لیگ فوتبال

یک الگوریتم فراابتکاری جدید و بسیار قدرتمند است. این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی عدد صحیح، بسیار توانمند می‌باشد. این الگوریتم از لیگ حرفه‌ای فوتبال الهام گرفته که مبنای آن رقابت بین تیم‌های مختلف فوتبال برای رسیدن به جایگاه بهتر در جدول و همچنین رقابت بین بازیکنان، برای کسب عنوان بهترین بازیکن لیگ

جدول ۳. مشخصات مربوط به بتن دارای سرباره  
Table 3. Characteristics of slag concrete

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر
۱۰۳/۷۲	۲۷۸/۲	۴۷۵	۱۰۲	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)
۶۰/۷۲	۱۶۹/۶	۳۵۹/۴	۳۸	سرباره (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۴/۸۶	۱۸۴/۶	۲۲۸	۱۲۶/۶	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷/۲۸	۶/۱	۳۲/۲	.	فوق روان کننده (کیلوگرم بر متر مکعب)
۶۵/۰۵	۹۴۷/۱	۱۱۴۵	۸۱۱	سنگدانه درشت (کیلوگرم بر متر مکعب)
۹۴/۱۸	۷۵۸/۳	۹۹۲/۶	۵۹۴	سنگدانه ریز (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۵/۴۶	۵۲/۴	۳۶۵	۳	سن (روز)
۰/۱۳۵	۰/۴	۰/۸	۰/۲	آب به مواد چسباننده
۰/۱۴۸	۰/۴	۰/۶	۰/۱	سرباره به مواد چسباننده
۰/۰۱	.	۰/۱	.	فوق روان کننده به مواد چسباننده
۰/۰۴	۰/۴	۰/۵	۰/۳	سنگدانه ریز به سنگدانه کل
۰/۵۷	۲/۲	۳/۵	۱/۴	سنگدانه درشت به مواد چسباننده
۱۹/۲۸	۴۰/۱	۸۲/۶	۲/۳	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

مختلف به توان متغیرهای تصمیم و رادیکالی. ۴۰۰ عدد مختلف مثبت و منفی به عنوان ضرایب هر ورودی در نظر گرفته شد که فرم نهایی هر ورودی از حاصل ضرب یک تابع از بین ۲۰ حالت مختلف در ضریب انتخاب شده حاصل شده است. در نتیجه برای متغیرهای ورودی ۸۰۰۰ حالت در نظر گرفته شد. برای اینکه این ورودی‌ها را با یکدیگر ترکیب و تبدیل به یک فرمول کنیم از ۴۰۰ نوع تابع استفاده شده است. تابع هدف این الگوریتم‌ها، میانگین خطای مطلق در نظر گرفته شده است. سپس الگوریتم‌های فراابتکاری ۱۰ بار اجرا شده و مورد تحلیل قرار گرفتند که در نهایت بهترین جواب به دست آمده به عنوان جواب ارائه شده است.

انتهای هر لیگ (تکرار)، تیم‌های ضعیف‌تر از نظر تابع هدف بازیکنان، حذف می‌شوند و به جای آن‌ها تیم‌هایی به صورت تصادفی تولید شده و جایگزین آن‌ها می‌شوند [۲۰].

کدهای الگوریتم‌های فراابتکاری به برنامه‌ریزی عدد صحیح تبدیل گردیدند. برای برنامه‌ریزی عدد صحیح مقدار هر یک از پارامترهای ورودی مورد استفاده در بتن را یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. برای هر متغیر تصمیم ۲۰ حالت جداگانه اختصاص داده شد که هر یک از این ۲۰ حالت، توابع ریاضی متفاوت انتخاب شده‌اند. توابع مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از تابع لگاریتمی در میناهای مختلف، مثلثاتی (سینوس، کسینوس، تانژانت، کتانژانت)، نمایی، توانی، اعداد

جدول ۴. مشخصات مربوط به بتن دارای سرباره و خاکستر بادی  
Table 4. Characteristics of concrete containing fly ash and slag

انحراف معیار	میانگین	پیشینه	کمینه	پارامتر
۱۰۶/۴۳	۲۵۰/۲	۴۹۱	۱۳۲	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)
۵۸/۳۴	۸۶/۴	۲۱۴	۱۱	سرباره (کیلوگرم بر متر مکعب)
۳۸/۵۴	۱۱۷	۱۹۵	۲۴/۵	خاکستر بادی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۱/۳۱	۱۷۶/۴	۲۴۷	۱۲۱/۸	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۳/۴۷	۸/۸	۲۲/۱	۱/۷	فوق روان کننده (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۸/۶۴	۹۴۶/۲	۱۰۸۰/۸	۸۱۴	سنگدانه درشت (کیلوگرم بر متر مکعب)
۵۸/۳۶	۷۵۵/۳	۸۸۰	۶۱۲	سنگدانه ریز (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۳/۷۵	۳۱/۱	۱۰۰	۳	سن (روز)
۰/۰۸	۰/۴	۰/۶	۰/۳	آب به مواد چسباننده
۰/۴	۰/۵	۱/۶	۰	سرباره به سیمان
۰/۰۱	۰	۰	۰	فوق روان کننده به مواد چسباننده
۰/۰۲۵	۰/۴	۰/۵	۰/۴	سنگدانه ریز به سنگدانه کل
۰/۵	۲/۲	۳/۲	۱/۳	سنگدانه درشت به مواد چسباننده
۰/۳۲	۰/۶	۱/۴	۰/۱	خاکستر بادی به سیمان
۱۴/۲۲	۳۸/۳	۷۶/۲	۷/۳	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

۵ مگاپاسکال در تمامی مدل‌ها داشته باشند از مدل حذف شده‌اند. بعد از هرس کردن و حذف داده‌هایی که خطای انسانی و آزمایشگاهی در آن‌ها دخیل است، با بقیه داده‌ها کار ادامه پیدا کرده و داده‌ها به دو دسته داده‌های آموزشی و آزمایشی تقسیم شده‌اند، برای اعتبار سنجی مدل، با استفاده از ۷۵ درصد داده‌ها (داده‌های آموزشی) مدل ساخته شده و با ۲۵ درصد باقیمانده داده‌ها (داده‌های آزمایشی) مدل ساخته شده را امتحان و دقت مدل برآورد شده است. با استفاده از پارامترهای زیر دقت هر مدل در هر ۶ روش به دست

برای جلوگیری از به وجود آمدن خطای زیاد در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن از هرس کردن داده‌ها استفاده گردید. با توجه به جدول‌های ۱-۴، متغیرهای ورودی و خروجی برای هر ۴ دسته بتن مشخص شده‌اند، که این داده‌ها با استفاده از ۴ روش رگرسیونی خطی، چند جمله‌ای درجه دو، نمایی، لگاریتمی و ۲ الگوریتم فراابتکاری (ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال) برازش داده شده و رابطه بین متغیر ورودی و خروجی مشخص شده است. برای هرس کردن داده‌ها آن دسته از داده‌ها که مقاومت فشاری پیش‌بینی شده آن‌ها خطای بالای

جدول ۵. معادلات مربوط به رگرسیون غیر خطی  
Table 5. Non-linear regressions equations

معادله مربوطه	نام رگرسیون
$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i (x_i)^{\zeta}$	چند جمله‌ای درجه ۲
$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i \times e^{x_i}$	نمایی
$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i \log(x_i)$	لگاریتمی

هر دسته بتن انتخاب شده است. طرح مخلوط بهینه برای هر دسته بتن در مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال و سن ۲۸ روز، به طوری که کمترین هزینه را داشته باشد، طراحی شده است. تابع هدف در این مسئله بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه می‌باشد که برای هر ۴ دسته بتن رابطه زیر صادق است.

$$C_T = W_{ce} \times C_{ce} + W_w \times C_w + W_{ca} \times C_{ca} + W_{fa} \times C_{fa} + W_{fl} \times C_{fl} + W_{sl} \times C_{sl} + W_{bl} \times C_{bl} \quad (۶)$$

در معادله ۶،  $C_T$  هزینه کل،  $W_{ce}$  وزن سیمان،  $C_{ce}$  قیمت واحد سیمان،  $W_w$  وزن آب،  $C_w$  قیمت واحد آب،  $W_{ca}$  وزن سنگدانه درشت،  $C_{ca}$  قیمت واحد سنگدانه درشت،  $W_{fa}$  وزن سنگدانه ریز،  $C_{fa}$  قیمت واحد سنگدانه ریز،  $W_{fl}$  وزن خاکستر بادی،  $C_{fl}$  قیمت واحد خاکستر بادی،  $W_{sl}$  وزن سرباره،  $C_{sl}$  قیمت واحد سرباره،  $W_{bl}$  وزن فوق روان کننده و  $C_{bl}$  قیمت واحد فوق روان کننده می‌باشد.

به عنوان مثال بتن معمولی که شامل خاکستر بادی، سرباره نمی‌باشد، وزن آن‌ها صفر در نظر گرفته شد. محدودیت‌های این مسئله بهینه‌سازی عبارت‌اند از تمام متغیرهای ورودی باید در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ باشند که برای ۴ دسته بتن متفاوت بوده و قید بعدی طرح مخلوط ارائه شده مربوط به حجم نمونه بتن ساخته شده است که باید برابر یک متر مکعب بتن یا به عبارتی حجم برابر ۱ باشد.

آمده و برای هر یک از ۴ نوع بتن بهترین مدل که بیشترین دقت را دارا است، ارائه شده است.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |EXP_i - PRE_i|}{n} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (EXP_i - PRE_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (EXP_i - \overline{EXP_i}) \times (PRE_i - \overline{PRE_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (EXP_i - \overline{EXP_i})^2 \times \sum_{i=1}^n (PRE_i - \overline{PRE_i})^2}} \right)^2 \quad (۵)$$

که در معادلات بالا،  $EXP_i$  مقاومت فشاری آزمایشگاهی بتن،  $\overline{EXP_i}$  متوسط مقاومت فشاری آزمایشگاهی بتن،  $PRE_i$  مقاومت فشاری پیش بینی شده بتن،  $\overline{PRE_i}$  میانگین مقاومت فشاری های پیش بینی شده بتن و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشند.

پس از تعیین روابط مقاومت فشاری، دقت مدل‌ها با رابطه‌های (۳-۵) مقایسه شده و فرمولی که بیشترین دقت را دارا بوده، برای



جدول ۶. هزینه و وزن مخصوص مصالح مورد استفاده  
Table 6. Unit cost and density of utilized materials

وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	هزینه (دلار)	نام مصالح
۳۱۵۰	۰/۱۱	سیمان
۲۶۱۰	۰/۰۴۶	خاکستر بادی
۲۵۶۰	۰/۱	سرباره
۱۰۰۰	۰/۰۰۱	آب
۱۰۶۰	۳/۵	فوق روان کننده
۲۶۳۰	۰/۰۲۷	سنگدانه ریز
۲۸۵۰	۰/۰۱۳	سنگدانه درشت

شرح زیر می‌باشد. ترتیب معادلات بیان شده برای هر دسته بتن به صورت جداگانه به صورت رگرسیون خطی، رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو، رگرسیون لگاریتمی، رگرسیون نمایی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت لیگ فوتبال می‌باشد.

برای بتن حاوی خاکستر بادی معادلات به شرح زیر است.

$$CS = 0.731c + 1.541f - 0.122w - 0.555sp - 0.028ca - 0.765fi + 0.483a - 0.829wb - 1.709fb + 0.318spb + 1.151fit + 1.294cab - 0.048 \quad (8)$$

$$CS = 0.528(c)^2 + 0.495(f)^2 - 0.052(w)^2 + 0.387(sp)^2 + 0.340(ca)^2 + 0.078(fi)^2 + 0.417(a)^2 - 0.287(wb)^2 - 0.572(fb)^2 - 0.414(spb)^2 + 0.245(fit)^2 - 0.036(cab)^2 + 0.173 \quad (9)$$

$$CS = 0.352 \ln(c) + 0.517 \ln(f) - 0.012 \ln(w) - 1.133 \ln(sp) + 0.075 \ln(ca) - 0.184 \ln(fi) + 0.193 \ln(a) - 0.402 \ln(wb) - 0.420 \ln(fb) + 1.059 \ln(spb) + 0.361 \ln(fit) + 0.214 \ln(cab) + 1.192 \quad (10)$$

$$CS = 0.358 \times e^c + 0.424 \times e^f - 0.115 \times e^w + 0.098 \times e^{sp} + 0.124 \times e^{ca} - 0.025 \times e^{fi} + 0.270 \times e^a - 0.163 \times e^{wb} - 0.471 \times e^{fb} - 0.155 \times e^{spb} + 0.180 \times e^{fit} + 0.112 \times e^{cab} - 0.515 \quad (11)$$

$$V = \frac{W_{ce}}{Y_{ce}} + \frac{W_w}{Y_w} + \frac{W_{ca}}{Y_{ca}} + \frac{W_{fa}}{Y_{fa}} + \frac{W_{fl}}{Y_{fl}} + \frac{W_{sl}}{Y_{sl}} + \frac{W_{bl}}{Y_{bl}} + 0.02 \quad (7)$$

در معادله بالا  $V$  حجم بتن که مقدار آن برابر یک مترمکعب،  $Y_{ce}$  وزن مخصوص سیمان،  $Y_w$  وزن مخصوص آب،  $Y_{ca}$  وزن مخصوص سنگدانه درشت،  $Y_{fa}$  وزن مخصوص سنگدانه ریز،  $Y_{fl}$  وزن مخصوص خاکستر بادی،  $Y_{sl}$  وزن مخصوص سرباره و  $Y_{bl}$  وزن مخصوص فوق روان کننده می‌باشد. در معادله (۷)، عدد ۰/۰۲ با توجه به موسسه بین‌المللی بتن آمریکا، مربوط به حجم حباب هوای موجود در بتن است [۲۱] و همچنین با توجه به جدول ۶ مقادیر وزن مخصوص مصالح و هزینه نشان داده شده که از مقالات معتبر بین‌المللی استخراج شدند [۲۱-۲۶].

## ۲- نتایج

با توجه به متغیرهای ورودی در جدول‌های ۱ تا ۴ برای هر بتن به صورت جداگانه از بین ۲ الگوریتم فراابتکاری و ۴ نوع رگرسیون، بهترین مدل که دقت بالاتری داشت بعد از هرس کردن داده‌ها برای هر دسته بتن مشخص گردید. با استفاده از مدل‌های به دست آمده یک مسئله بهینه‌سازی حل گردید که هدف آن یافتن طرح اختلاط بهینه با کمترین هزینه و داشتن حداقل مقاومت فشاری آیین‌نامه‌ای می‌باشد.

۱- فرمول‌های به دست آمده برای هر ۴ دسته بتن به ۶ روش، به

$$CS = 0.343 \times e^c - 0.181 \times e^w - 2.748 \times e^{sp} - 0.073 \times e^{ca} + 0.139 \times e^{fi} + 0.186 \times e^a + 0.054 \times e^{wb} + 2.664 \times e^{spb} - 0.208 \times e^{fit} - 0.129 \times e^{cab} + 0.341 \quad (17)$$

$$CS = ((-0.6 \times 0.75 \times \log(c)) + (0.4 \times 0.75 \times (ca)^{-1}) + (0.8 \times 2^{\frac{1}{3}} \times \sin(w))) \times ((0.25 \times (sp)^{-1}) + (0.4 \times 0.75 \times (ca)^{-1}) + (0.4 \times 2^{\frac{1}{3}} \times (fi)^{-1}) + (0.1 \times 0.25 \times (a)^{-3}))^{-0.3 \times 5^{0.5}} + (-0.5 \times 3^{\frac{1}{3}} \times \log(wb)) \quad (18)$$

$$\left( \frac{+(-0.1 \times 0.25 \times (fit)^2)}{(0.9 \times 0.75 \times \tan(sp)) + (0.9 \times 1.75 \times 3^{cab}) + (-0.6 \times 3^{0.5})} \right)$$

$$CS = \exp((-0.7 \times 0.75 \times (spb)^{-1}) + (-0.4 \times 1.75 \times 4^{fit})) + \exp((-0.5 \times 2 \times 4^{wb}) + (-0.2 \times 7^{0.5} \times \log(cab)) + (-0.1 \times 0.75)) + \left( \frac{-0.2 \times 7^{0.5} \times 3^c + (0.9 \times 7^{0.5} \times (sp)^3) + (-2^{ca})}{(-6^{0.5} \times 4^w) + (-0.1 \times 0.25 \times a^{-3}) + (-2.25)} \right) \quad (19)$$

معادلات (۲۰-۲۵) بیان کننده ۶ مدل برای تعیین مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره می‌باشند.

$$CS = 0.332(c)^2 - 0.018(b)^2 - 0.545(w)^2 - 0.391(sp)^2 - 0.202(ca)^2 + 0.107(fi)^2 + 0.510(a)^2 + 0.656(wb)^2 + 0.034(sb)^2 + 0.451(spb)^2 - 0.485(fit)^2 - 0.645(cab)^2 + 0.681 \quad (20)$$

$$CS = 0.003 \ln(c) - 0.075 \ln(b) + 0.024 \ln(w) - 0.116 \ln(sp) + 0.181 \ln(ca) - 0.058 \ln(fi) + 0.218 \ln(a) - 0.028 \ln(wb) + 0.056 \ln(sb) + 0.238 \ln(spb) + 0.133 \ln(fit) - 0.161 \ln(cab) + 0.99 \quad (21)$$

$$CS = ((-0.7 \times 2^{\frac{1}{3}} \times \log_2^c) + (-0.4 \times 1.75 \times (f)^2) + (0.5 \times 0.25 \times \cos(w))) \times ((-0.9 \times 1.5 \times \log_2^{(sp)}) + (-0.4 \times 2.5 \times 3^{0.5} \times ca) + (0.7 \times 4^{\frac{1}{3}} \times \cos(fi)) + (0.4 \times 1.25 \times a^{-2}))^{-0.3 \times 0.75} + (0.8 \times (wb)^2) + (-0.1 \times 0.5 \times 2^{(fit)}) + \left( \frac{+0.4 \times 0.5 \times (fb)}{(0.5 \times 0.75 \times \log_2^{(spb)}) + (-0.9 \times 1.25 \times \sin(cab)) + (-0.3 \times 1.5)} \right) \quad (12)$$

$$CS = ((-0.2 \times 3^{\frac{1}{3}} \times (wb)) \times (0.7 \times 0.75 \times 4^{(spb)})) + (-0.2 \times 2 \times 3^{0.5} \times (fb)) + ((0.1 \times 0.5 \times \log_2^{(fit)}) \times (0.3 \times \log(cab)) + (0.2 \times 5^{0.5})) + (0.5 \times 0.25 \times \tan(c)) + \left( \frac{-0.9 \times 0.75 \times (sp)^2 + (-0.8 \times 1.5 \times 2^f)}{(-1.75 \times w) + (-0.2 \times 5^{0.5} \times a^{-1}) + (-0.6 \times 6^{0.5})} \right) \quad (13)$$

معادلات (۱۴-۱۹) مربوط به مقاومت فشاری بتن معمولی می‌باشند

$$CS = 0.795c - 0.597w - 4.692sp + 1.150ca - 1.574fi + 0.335a + 0.874wb + 4.485spb + 2.146fit - 0.727cab - 0.829 \quad (14)$$

$$CS = 0.523(c)^2 - 0.240(w)^2 - 4.881(sp)^2 - 0.097(ca)^2 + 0.180(fi)^2 + 0.267(a)^2 + 0.086(wb)^2 + 4.803(spb)^2 - 0.312(fit)^2 - 0.299(cab)^2 + 0.397 \quad (15)$$

$$CS = -0.14 \ln(c) + 0.312 \ln(w) - 2.107 \ln(sp) - 0.038 \ln(ca) - 0.071 \ln(fi) + 0.134 \ln(a) - 0.913 \times \ln(wb) + 2.036 \ln(spb) + 0.133 \ln(fit) + 0.378 \ln(cab) + 1.187 \quad (16)$$

$$CS = 0.294(c)^2 + 0.779(b)^2 + 0.512(f)^2 - 0.677(w)^2 - 0.638(sp)^2 + 0.362(ca)^2 - 0.022(fi)^2 + 0.419(a)^2 + 0.295(wb)^2 - 0.476(sc)^2 + 0.370(spb)^2 + 0.136(fit)^2 - 0.574(cab)^2 - 0.792(fc)^2 + 0.372 \quad (۲۷)$$

$$CS = 0.817 \ln(c) + 0.021 \ln(b) + 0.703 \ln(f) + 0.150 \ln(w) - 0.522 \ln(sp) + 0.0325 \ln(ca) + 0.285 \ln(fi) + 0.197 \ln(a) - 0.222 \ln(wb) + 0.124 \ln(sc) + 0.429 \ln(spb) - 0.195 \ln(fit) - 0.082 \ln(cab) + 1.073 \ln(fc) + 2.206 \quad (۲۸)$$

$$CS = 0.232 \times e^c + 0.505 \times e^b + 0.403e^f - 0.576 \times e^w - 0.487 \times e^{sp} + 0.297 \times e^{ca} - 0.069 \times e^{fi} + 0.279 \times e^a + 0.363 \times e^{wb} - 0.264 \times e^{sc} + 0.320 \times e^{spb} + 0.167 \times e^{fit} - 0.481 \times e^{cab} - 0.484e^{fc} + 0.073 \quad (۲۹)$$

$$CS = ((-0.3 \times 7^{0.5} \times c^3) + (0.5 \times b^{\frac{1}{3}}) + (-0.5 \times 1.75 \times \tan(w)) + (-0.3 \times 3^{\frac{1}{3}} \times f^{0.5})) \times ((-0.3 \times 7^{0.5} \times (sp)^3) + (-0.5 \times 2^{0.5} \times (ca)) + (0.5 \times \cos(fi))) + (-0.1 \times 1.75 \times a^{-2})^{-0.4 \times 0.25} + \sin((-0.1 \times 7^{0.5} \times 2^{(fc)}) + (-0.3 \times 2^{\frac{1}{3}} \times 2^{0.5} \times (wb)) + (-0.2 \times \tan(sc))) \times \cos((-0.6 \times 0.75 \times \cos(spb)) + (0.1 \times 7^{0.5} \times (fit)^3)) \quad (۳۰)$$

$$CS = ((0.8 \times c^2) + (0.5 \times 0.75 \times \log_2^b) + ((-7)^{0.5} \times e^w) + (0.6 \times 4^{\frac{1}{3}} \times 4^f)) \times ((0.5 \times 2.5 \times \sin(sp)) + (0.1 \times 5^{0.5} \times (ca)^{-1}) + ((-2)^{\frac{1}{3}} \times 2^{fi})) + (-0.2 \times 1.75 \times a^{-3})^{-0.5 \times 0.25} + (-0.9 \times 2^{\frac{1}{3}} \times \tan(wb)) + \frac{(0.2 \times 0.25 \times 2^{0.5} \times (fit)) + (-0.6 \times (sc)^2)}{(0.3 \times 0.5 \times (spb)^{-1}) + (0.5 \times \cos(cab))} + (0.6 \times 1.25 \times (fc)^{-1}) + (0.2 \times 2.25) \quad (۳۱)$$

$$CS = 0.003 \ln(c) - 0.075 \ln(b) + 0.024 \ln(w) - 0.116 \ln(sp) + 0.181 \ln(ca) - 0.058 \ln(fi) + 0.218 \ln(a) - 0.028 \ln(wb) + 0.056 \ln(sb) + 0.238 \ln(spb) + 0.133 \ln(fit) - 0.161 \ln(cab) + 0.99 \quad (۲۲)$$

$$CS = 0.23 \times e^c - 0.04 \times e^b - 0.421 \times e^w - 0.191 \times e^{sp} - 0.293 \times e^{ca} + 0.166 \times e^{fi} + 0.379 \times e^a + 0.32 \times e^{wb} + 0.078 \times e^{sb} + 0.214 \times e^{spb} - 0.539 \times e^{fit} - 0.274 \times e^{cab} + 1.298 \quad (۲۳)$$

$$CS = ((-0.7 \times 7^{0.5} \times (wb)^{\frac{1}{3}}) \times (-0.1 \times 4^{\frac{1}{3}} \times 3^{0.5} \times (spb))) + (-0.1 \times 4^{\frac{1}{3}} \times 3^{0.5} \times (sb)) + ((-0.4 \times 2 \times \cos(fit)) \times (0.5 \times 0.5 \times \log(cab))) + 0.6 + \frac{(-0.9 \times 7^{0.5} \times (c)^2) + (-2 \times 4^s) + (-0.4 \times 2.25 \times w^3)}{(-0.6 \times 0.75 \times (sp)^{-1}) + (-2.5 \times (ca)^{-1})} + (-0.2 \times 4^{\frac{1}{3}}) + (-0.6 \times 0.25 \times (fi)^{-2}) + (-0.1 \times 0.5 \times (a)^{-3}) \quad (۲۴)$$

$$CS = \sin((-0.3 \times 1.75 \times \log(wb)) + (0.4 \times 0.25 \times \cos(sb))) \times \cos((-0.4 \times 0.25 \times (spb)^{-1}) + (0.3 \times 1.25 \times 3^{0.5} \times (fit))) + \frac{(-0.5 \times 6^{0.5} \times c^{0.5}) + \left(-0.9 \times 3^{\frac{1}{3}} \times (sp)^{0.5}\right)}{(-0.7 \times 7^{0.5} \times (w)^{-1}) + (-0.1 \times 0.25 \times a^{-3}) + (-7^{0.5})} \quad (۲۵)$$

دسته آخر بتن‌ها، بتن حاوی سرباره و خاکستر بادی می‌باشد که فرمول‌های زیر مقاومت فشاری این دسته بتن را پیش‌بینی می‌کنند.

$$CS = 0.472c + 0.776b + 0.663f - 1.287w - 0.840sp + 1.379ca - 1.080fi + 0.499a + 1.004wb - 0.363sc + 0.593spb + 1.591fit - 1.219cab - 0.641fc - 0.139 \quad (۲۶)$$

جدول ۷. نام‌گذاری مدل‌ها  
Table 7. Models' names

نام اختصار	روش مدل سازی	نام دسته بتن
FA-LR	رگرسیون خطی	بتن شامل خاکستر بادی
FA-PR	رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو	بتن شامل خاکستر بادی
FA-ER	رگرسیون نمایی	بتن شامل خاکستر بادی
FA-LOR	رگرسیون لگاریتمی	بتن شامل خاکستر بادی
FA-GA	ژنتیک	بتن شامل خاکستر بادی
FA-SLC	رقابت لیگ فوتبال	بتن شامل خاکستر بادی
FAS-LR	رگرسیون خطی	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره
FAS-PR	رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره
FAS-ER	رگرسیون نمایی	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره
FAS-LOR	رگرسیون لگاریتمی	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره
FAS-GA	ژنتیک	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره
FAS-SLC	رقابت لیگ فوتبال	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره
OC-LR	رگرسیون خطی	بتن معمولی
OC-PR	رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو	بتن معمولی
OC-ER	رگرسیون نمایی	بتن معمولی
OC-LOR	رگرسیون لگاریتمی	بتن معمولی
OC-GA	ژنتیک	بتن معمولی
OC-SLC	رقابت لیگ فوتبال	بتن معمولی
BFGS-LR	رگرسیون خطی	بتن شامل سرباره
BFGS-PR	رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو	بتن شامل سرباره
BFGS-ER	رگرسیون نمایی	بتن شامل سرباره
BFGS-LOR	رگرسیون لگاریتمی	بتن شامل سرباره
BFGS-GA	ژنتیک	بتن شامل سرباره
BFGS-SLC	رقابت لیگ فوتبال	بتن شامل سرباره

مقدار مقیاس شده سنگدانه درشت،  $fi$  مقدار مقیاس شده سنگدانه ریز،  $a$  مقدار مقیاس شده سن،  $wb$  مقدار مقیاس شده آب به مواد چسباننده،  $sc$  مقدار مقیاس شده سرباره به سیمان،  $sb$  مقدار مقیاس شده سرباره به مواد چسباننده،  $spb$  مقدار مقیاس شده فوق روان کننده به مواد چسباننده،  $fb$  مقدار خاکستر بادی به مواد چسباننده،  $fit$  مقدار مقیاس شده سنگدانه ریز به مواد چسباننده،

در معادلات (۳۱-۸) به جز مقاومت فشاری که متغیر خروجی می‌باشد بقیه پارامترها با معادله ۱ مقیاس شده‌اند. پارامترها به شرح زیر است:

$CS$  مقاومت فشاری بتن،  $c$  مقدار مقیاس شده سیمان،  $b$  مقدار مقیاس شده سرباره،  $f$  مقدار مقیاس شده خاکستر بادی،  $w$  مقدار مقیاس شده آب،  $sp$  مقدار مقیاس شده فوق روان کننده،  $ca$

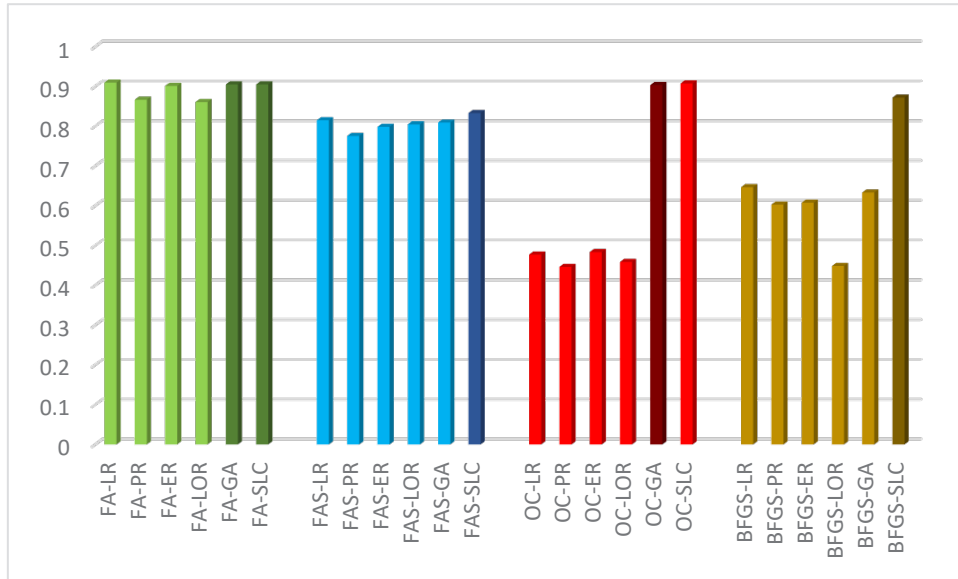
جهت مقایسه دقت و عملکرد روش‌های یادگیری ماشین، نتایج  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $MAE$  برای دسته‌های مختلف بتن به ترتیب در شکل ۱، شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

شکل ۱ مربوط به نتایج پارامتر  $R^2$  است که هر چهار دسته بتن در آن نمایش داده شده است. دسته سبز رنگ مربوط به بتن حاوی خاکستر بادی، قسمت آبی رنگ نشان دهنده بتن شامل سرباره و

$cab$  مقدار مقیاس شده سنگدانه درشت به مواد چسباننده و  $fc$  مقدار خاکستر بادی به سیمان می‌باشد.

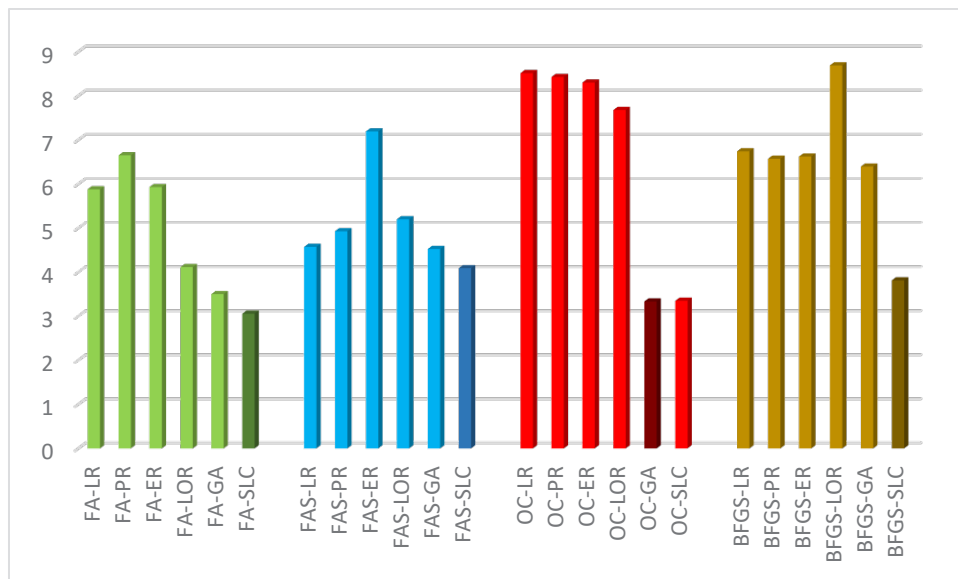
### ۳-۲-عملکرد روش‌های یادگیری ماشین

برای مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین، همان‌طوری که ذکر شد از روابط ۳، ۴ و ۵ استفاده می‌شود. در جدول ۷ نام هر دسته بتن با روش مدل‌سازی آن به اختصار بیان شده است.



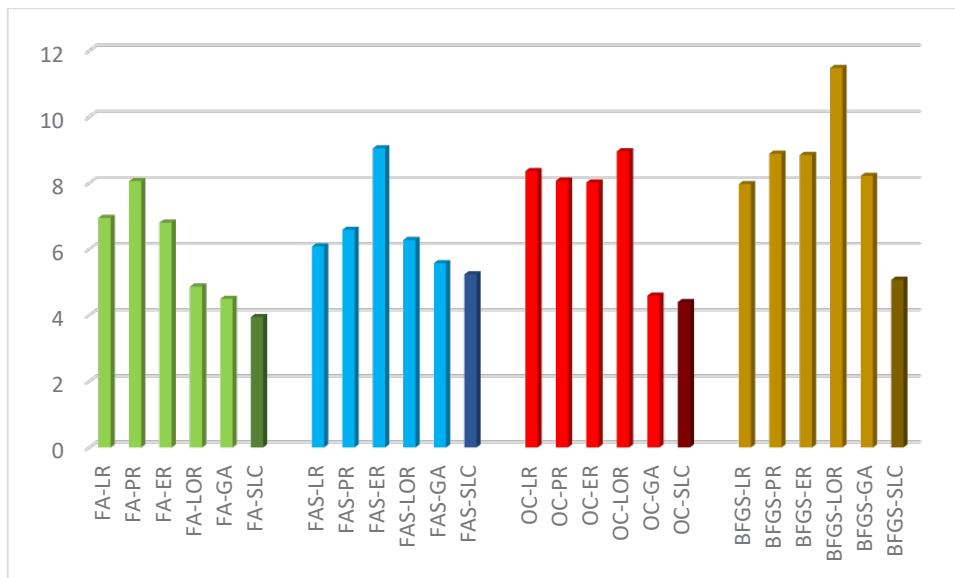
شکل ۱. مقایسه دقت مدل‌های یادگیری ماشین برای ۴ دسته بتن بر اساس  $R^2$

Fig. 1. Machine learning methods' precision based on  $R^2$  for different concrete types



شکل ۲. مقایسه دقت مدل‌های یادگیری ماشین برای ۴ دسته بتن بر اساس  $MAE$

Fig. 2. Machine learning methods' precision based on  $MAE$  for different concrete types



شکل ۳. مقایسه دقت مدل‌های یادگیری ماشین برای ۴ دسته بتن بر اساس  $RMSE$

Fig. 3. Machine learning methods' precision based on RMSE for different concrete types

$RMSE$  یا خطای جذر میانگین مربعات، سنجیده شده است. خطای جذر میانگین مربعات مانند میانگین خطای مطلق هر چه مقدار کمتری داشته باشد، دقت روش بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است برای هر چهار دسته بتن خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره، معمولی و بتن شامل سرباره روش رقابت لیگ فوتبال بالاترین دقت را داشته که مقدار خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب برابر  $۳/۹۴$ ،  $۵/۲۳$ ،  $۴/۳۹$  و  $۵/۰۶$  می‌باشد. اگر چه روش رقابت لیگ فوتبال در چهار دسته از بقیه روش‌ها بهتر است اما روش ژنتیک در سه دسته بتن اول اختلاف ناچیزی با روش رقابت لیگ فوتبال دارد و از دقت بالاتری نسبت به ۴ روش رگرسیون برخوردار است.

مقایسه دقت مدل‌ها بر اساس سه پارامتر  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $MAE$  انجام شد. حال برای انتخاب بهترین پیش‌بینی برای هر دسته بتن باید نتایج این سه پارامتر را با یکدیگر ترکیب کرده و بهترین فرمول گزارش شود.

برای بتن حاوی خاکستر بادی،  $R^2$  دو روش ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال تقریباً برابر بوده اما مقدار  $RMSE$  و  $MAE$  در روش رقابت لیگ فوتبال از بقیه روش‌ها کمتر بوده و از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. در نتیجه برای این دسته بتن معادله (۱۳) به عنوان با دقت‌ترین مدل معرفی شده است.

خاکستر بادی، محدوده قرمز رنگ نشان دهنده دسته بتن معمولی و قسمت آخر رنگ قهوه‌ای، بتن حاوی سرباره را نمایش می‌دهد. در هر دسته بتن که رنگ مخصوص به خود را دارد، یک قسمت پررنگ‌تر نشان داده شده که بیانگر بیشترین دقت  $R^2$  است. در دسته بتن حاوی خاکستر بادی، دو ستون آخر پررنگ‌تر نمایش داده شده که نشان دهنده بیشترین  $R^2$  در مقایسه با بقیه روش‌ها می‌باشد که مقدار آن برای دو روش ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال برابر  $۰/۹۰۵$  است. در بتن شامل خاکستر بادی و سرباره بهترین  $R^2$  را روش رقابت لیگ فوتبال با مقدار  $۰/۸۳۲۹۸۴$  دارا می‌باشد. همچنین بتن معمولی و بتن شامل سرباره به ترتیب بالاترین  $R^2$  را توسط روش ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال دارند.

در شکل ۲ دقت ۶ روش پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن (۴ روش رگرسیون، ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال) برای هر چهار دسته بتن بر اساس  $MAE$  نمایش داده شده است.  $MAE$  یا میانگین خطای حقیقی هر چه کمتر باشد بیانگر دقت بالای روش پیش‌بینی است. در هر ۴ دسته بتن به جز بتن معمولی روش رقابت لیگ فوتبال کمترین میانگین خطای حقیقی را داشته است. در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن معمولی از نظر  $MAE$ ، روش ژنتیک بالاترین دقت را دارا بوده است.

در شکل ۳، دقت روش‌های پیش‌بینی مقاومت بتن بر اساس

مقدار خطای جذر میانگین مربعات و میانگین خطای مطلق و بیشترین مقدار  $R^2$  را داراست. معادله (۲۵)، مربوط به بهترین روش است که از روش رقابت لیگ فوتبال برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره استفاده شده است.

حال برای پیش‌بینی طرح مخلوط بهینه بتن‌های شامل خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره، معمولی و سرباره به ترتیب از معادلات ۱۳، ۳۱، ۱۸ و ۲۵ استفاده می‌شود.

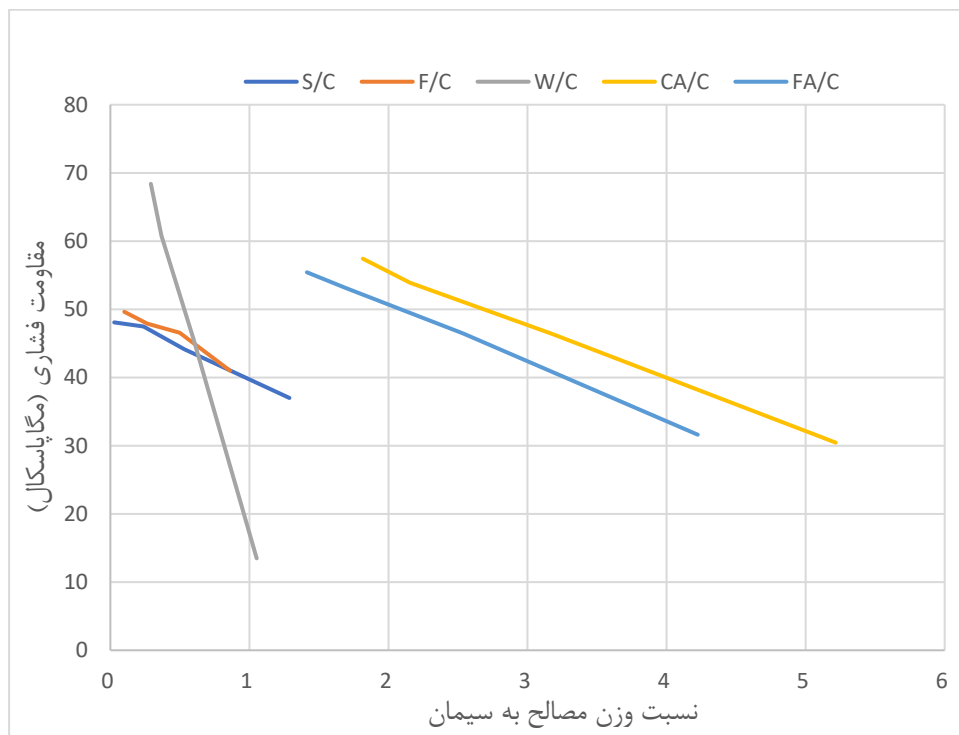
#### ۲-۴- تحلیل حساسیت

در این بخش، جهت بررسی دقت مدل معرفی شده و بررسی هر تاثیر هر یک از مواد و مصالح بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، تحلیل حساسیت مطابق پژوهش ناصری و همکاران [۲۸] اجرا گردید. به این منظور، رابطه برگزیده در بتن حاوی سرباره و خاکستر بادی مورد استفاده قرار گرفت. در رابطه مذکور، به تمامی مصالح مقدار میانگین حاصل از داده‌های اولیه اختصاص گردید. سپس، مقدار سیمان در بازه ی مجاز تغییر یافته و وزن یکی از مصالح طوری محاسبه گردید که حجم طرح مخلوط یک متر مکعب گردد. پس از آن، طرح

در مورد بتن شامل خاکستر بادی و سرباره مقدار  $R^2$  روش رقابت لیگ فوتبال از بقیه روش‌ها بیشتر بوده. مقدار خطای جذر میانگین مربعات و میانگین خطای مطلق هم در روش رقابت لیگ فوتبال از بقیه روش‌ها کمتر بوده است که این نتیجه، نشان دهنده دقت بالای روش رقابت لیگ فوتبال در مورد پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن شامل خاکستر بادی و سرباره را نشان می‌دهد. روش ژنتیک به صورت کلی نسبت به ۴ روش رگرسیونی دقت بالاتری را داشته است. معادله (۳۱) بیشترین دقت را در بین بقیه کلیه روش‌ها برای این دسته بتن را نمایش می‌دهد.

در مورد بتن معمولی مقدار  $R^2$ ،  $RMSE$  دو روش رقابت لیگ فوتبال و ژنتیک مقدارهایی تقریباً برابر با یکدیگر دارند و از بقیه روش‌ها بهتراند. بر اساس شاخص میانگین خطای مطلق، روش پیش‌بینی ژنتیک مقدار کمتری نسبت به رقابت لیگ فوتبال دارد در نتیجه دقت بالاتری را داراست و بهترین مدل برای پیش‌بینی مقاومت بتن است که معادله (۱۸) نشان دهنده این رابطه است.

دسته آخر مربوط به بتن حاوی سرباره است. همان‌طوری که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است روش رقابت لیگ فوتبال کمترین



شکل ۴. تحلیل حساسیت مصالح مورد استفاده در این پژوهش  
Fig. 4. Concrete ingredients' sensitivity analysis

افزایش وزن سرباره به نسبت خاکستر بادی سبب کاهش مقاومت فشاری با شیب کمتری می شود. این نتیجه مطابق یافته های سایر پژوهشگران می باشد [۳۱].

#### ۵-۲- پیش بینی طرح مخلوط بهینه بتن

برای هر دسته بتن در مرحله قبل، با دقت ترین فرمول ارائه شد. برای انتخاب بهینه ترین طرح مخلوط یک مسئله بهینه سازی تعریف شد که تابع هدف آن کمینه کردن هزینه است. همان طور که در بخش روش تحقیق ذکر شد بتن مورد نظر باید مقاومتی برابر با ۴۰ مگاپاسکال داشته باشد. در این بخش با دقت ترین مدل های انتخاب شده از هر دسته، با یکدیگر مقایسه شده و طرح مخلوط بهینه ارائه می شود.

هزینه، در پروژه های عمرانی فاکتور بسیار مهمی برای تصمیم گیری است. با توجه به جدول ۸ هزینه ساخت هر دسته بتن با در نظر گرفتن مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال قابل مشاهده می باشد. بتن های شامل خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره و بتن حاوی سرباره به

مخلوط های حاصله در رابطه مقاومت فشاری قرار داده شده و میزان مقاومت فشاری محاسبه گردید. در نتیجه، رابطه مقاومت فشاری بر اساس نسبت تغییرات نرخ وزن مصالح مورد بررسی به وزن سیمان محاسبه گردید. تحلیل مذکور برای تمامی مصالح اجرا گردیده و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، سیمان بیشترین تاثیر را در مقاومت فشاری ۲۸ روزه دارد. زیرا، با افزایش نرخ وزن تمامی مصالح به سیمان مقاومت فشاری بتن کاهش می یابد. همچنین، آب کمترین تاثیر در افزایش مقاومت را دارد. به عبارت دیگر، اگر میزان آب در طرح مخلوط بیشتر شود مقاومت فشاری ۲۸ روزه به شکل قابل توجهی کاهش می یابد. این نتایج مطابق یافته های سایر محققین می باشد [۲۹ و ۳۰]. شیب دو نمودار سنگدانه ریز به سیمان و سنگدانه درشت به سیمان تقریباً یکسان می باشد و لذا تاثیر سنگدانه درشت و ریز در مقاومت فشاری ۲۸ روزه تقریباً برابر می باشد. این یافته مطابق نتایج ارائه شده توسط ناصری و همکاران [۲۸] می باشد. خاکستر بادی و سرباره تاثیر تقریباً یکسانی در مقاومت ۲۸ روزه دارند، هر چند

جدول ۸. طرح مخلوط بهینه برای هر دسته بتن و هزینه ساخت مربوطه

Table 8. Optimal mixture proportions and their corresponding cost

پارامتر	بتن شامل خاکستر بادی	بتن شامل سرباره	بتن شامل خاکستر بادی و سرباره	بتن معمولی
سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۱۷/۲۵	۱۰۲	۱۵۰/۴۷	۴۱۴/۶۴
سرباره (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰	۳۰۲/۱۲	۹۰/۰۷	۰
خاکستر بادی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۰۰	۰	۱۱۹۳	۰
آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۶۱/۳۹	۱۹۵/۰۱	۱۷۲/۷۴	۱۰۱/۵۹
فوق روان کننده (کیلوگرم بر مترمکعب)	۴/۱۸	۶/۲۱	۶/۱۵	۱۲/۱۷
سنگدانه درشت (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۰۹۸	۸۵۹/۹۶	۱۰۷۴/۶۵	۱۱۲۵
سنگدانه ریز (کیلوگرم بر مترمکعب)	۷۴۶/۳۹	۸۵۹/۹۶	۷۰۳/۴۶	۸۹۵/۶۳
هزینه (دلار)	۸۲/۳۲	۹۷/۷۶	۸۹/۱۳	۱۲۷/۱۳



$MAE = 3.812$  دارا بوده و بهتر از بقیه‌ی مدل‌ها مقاومت فشاری بتن را پیش‌بینی کردند.

• دو روش یادگیری ماشین ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال، در این چهار دسته بتن عملکرد بهتری نسبت به روش‌های رگرسیون مرسوم داشتند و مقاومت فشاری را بهتر پیش‌بینی کردند. روش رقابت لیگ فوتبال نسبت به روش ژنتیک در پیش‌بینی مقاومت فشاری سه دسته بتن حاوی افزودنی عملکرد بهتری داشت اما در مورد بتن معمولی روش یادگیری ماشین ژنتیک، با اختلاف اندکی از روش رقابت لیگ فوتبال با دقت‌تر عمل کرد. روش‌های رگرسیون برای پیش‌بینی مناسب نبودند اما در بین این چهار روش، رگرسیون خطی دقت نسبتاً بالاتری در مقایسه با رگرسیون‌های نمایی، چند جمله‌ای درجه دو و لگاریتمی دارا بوده است.

• از نظر هزینه ساخت بتنی با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال، به ترتیب بتن حاوی خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره، سرباره و بتن معمولی کمترین هزینه ساخت را دارا اند. بتن خاکستر بادی با هزینه ساخت یک متر مربع آن ۸۲/۳۲ دلار و بتن معمولی با هزینه ساخت ۱۲۷/۱۳ دلار به ترتیب ارزان‌ترین و گران‌ترین بتن‌ها در بین این چهار دسته هستند. بتن حاوی خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره و بتن شامل سرباره به ترتیب ۳۵/۲، ۲۹/۹ و ۲۳/۱ درصد نسبت به بتن معمولی هزینه را کاهش دادند.

• در بتن حاوی سرباره، میزان مصرف سیمان ۱۰۲ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که کمترین میزان مصرف سیمان را در بین ۴ دسته بتن دارد. بتن شامل سرباره و خاکستر بادی، خاکستر بادی و بتن معمولی به ترتیب ۱۵۰/۴۷، ۲۱۷/۲۵ و ۴۱۴/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان دارد.

### مراجع

- [1] P.K. Mehta, Reducing the environmental impact of concrete, Concrete international, 23(10) (2001) 61-66.
- [2] A.M. Rashad, An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads, Journal of Cleaner Production, 87 (2015) 735-744
- [3] R. Feiz, J. Ammenberg, L. Baas, M. Eklund, A. Helgstrand,

ترتیب ۳۵/۲، ۲۹/۹ و ۲۳/۱ درصد نسبت به بتن معمولی، هزینه آن‌ها کاهش پیدا کرده است. بتن شامل خاکستر بادی برای مقاومت ۴۰ مگاپاسکال از لحاظ هزینه، مناسب‌ترین گزینه از بین بقیه‌ی بتن‌ها می‌باشد.

همان‌طور که در قسمت مقدمه گفته شد، سیمان به علت تولید گاز کربن دی‌اکسید یکی از مواد زیان‌آور برای محیط زیست است. با توجه به جدول ۸، بتن حاوی سرباره کمترین مقدار سیمان مصرفی را در بین بقیه‌ی بتن‌ها دارد و نسبت به بتن معمولی ۷۵/۴ درصد مصرف سیمان را کاهش داده است. ۷ درصد آلودگی محیط زیست بر اثر تولید سیمان است. با فرض اینکه تمام مصالح سیمان در بتن استفاده شود، اگر به جای بتن معمولی از بتن حاوی سرباره استفاده شود حدود ۵/۲۷ درصد کل آلودگی محیط زیست کاهش پیدا می‌کند.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو روش یادگیری ماشین جدید (ژنتیک و رقابت لیگ فوتبال) معرفی شدند و با چهار روش رگرسیون معمول (خطی، چند جمله‌ای درجه دو، نمایی و لگاریتمی) برای پیش‌بینی مقاومت فشاری چهار دسته بتن (خاکستر بادی، خاکستر بادی و سرباره، سرباره و معمولی) استفاده شدند. همچنین روابط مقاومت فشاری دسته‌های مختلف بتن بر اساس مواد و مصالح و نسبت‌های آن‌ها ارائه گردید. سپس با استفاده از سه شاخص  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $MAE$  دقت مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد و برای هر دسته بتن با دقت‌ترین مدل انتخاب شد و از آن برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شد. در مسئله بهینه‌سازی هدف کمینه کردن هزینه ساخت بتنی که مقاومت ۴۰ مگاپاسکال دارد و طرح اختلاط بهینه هر دسته بیان شد. نتایج این تحقیق به شکل زیر می‌باشد:

• در بتن خاکستر بادی مدل مربوط به روش رقابت لیگ فوتبال با  $R^2 = 0.9049$  و  $MAE = 3.055$  به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی و سرباره از روش رقابت لیگ فوتبال استفاده گردید که دارای  $R^2 = 0.8329$  و  $MAE = 4.087$  می‌باشد. همچنین برای بتن معمولی روش ژنتیک بهترین روش با  $R^2 = 0.9035$  و  $MAE = 3.333$  انتخاب شد. بتن حاوی سرباره مانند دو دسته اول مدل رقابت لیگ فوتبال بیشترین دقت را با  $R^2 = 0.8718$  و

- Journal of Computing in Civil Engineering, 13 (1999) 36-42
- [13] F. Özcan, C.D. Atiş, O. Karahan, E. Uncuoğlu, H. Tanyildizi, Comparison of artificial neural network and fuzzy logic models for prediction of long-term compressive strength of silica fume concrete, *Advances in Engineering Software* (2009) 865-863
- [14] A. Behnood, E.M. Golafshani, Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolves, *Journal of cleaner production*, 202 (2018) 54-64.
- [15] T. Kim, J.M. Davis, M.T. Ley, S. Kang, P. Amrollahi, Fly ash particle characterization for predicting concrete compressive strength, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 560-571
- [16] H. Naseri, H. Jahanbakhsh, F. Moghadas Nejad, Developing a novel machine learning method to predict the compressive strength of fly ash concrete in different ages, *AUT Journal of Civil Engineering*, (2019).
- [17] M. Mirzahosseini, P. Jiao, K. Barri, K.A. Riding, A.H. Alavi, New machine learning prediction models for compressive strength of concrete modified with glass cullet, *Engineering Computations*, (2019).
- [18] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, MIT press, 1992
- [19] H. Naseri, M.A.E. Ghasbeh, Time-cost trade off to compensate delay of project using genetic algorithm and linear programming, *Int J Innov Manag Technol*, 9(6) (2018).
- [20] N. Moosavian, B.K. Roodsari, Soccer league competition algorithm: a novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks, *Swarm and Evolutionary Computation*, 17 (2014) 14-24.
- [21] A. Committee, Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete Reported by ACI Committee 211, in: *American Concrete Institute*, 2002, pp. 1-26.
- [22] L. Assi, K. Carter, E.E. Deaver, R. Anay, P. Ziehl, Sustainable concrete: building a greener future, *Journal of cleaner production*, 198 (2018) 1641-1651.
- R. Marshall, Improving the CO<sub>2</sub> performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry, *Journal of Cleaner Production*, 98 (2015) 272-281.
- [4] S. Ghavami, B. Farahani, H. Jahanbakhsh, F. Moghadas Nejad, Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay, *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(2) (2018) 135-142
- [5] F.M. Nejad, M. Habibi, P. Hosseini, H. Jahanbakhsh, Investigating the mechanical and fatigue properties of sustainable cement emulsified asphalt mortar, *Journal of Cleaner Production*, 156 (2017) 717-728.
- [6] E.E. Ali, S.H. Al-Tersawy, Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 785-791.
- [7] M.H. Shehata, M.D. Thomas, The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 30(7) (2000) 1063-1072.
- [8] R. Siddique, Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*, 34(3) (2004) 487-493.
- [9] Compressive strength and hydratio E.A. Koenders, M. Pepe, E. Martinelli, processes of concrete with recycled aggregates, *Cement and Concrete Research*, 56 (2014) 203-212
- [10] M.M. Khotbehsara, B.M. Miyandehi, F. Naseri, T. Ozbakkaloglu, F. Jafari, E. Mohseni, Effect of SnO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, and CaCO<sub>3</sub> nanoparticles on water transport and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash: Experimental observations and ANFIS predictions, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 823-834.
- [11] I.-C. Yeh, Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks, *Cement and Concrete research*, 28(12) (1998) 1797-1808.
- [12] I.-C. Yeh, Design of high-performance concrete mixture using neural networks and nonlinear programming,

- Designing sustainable concrete mixture by developing a new machine learning technique, *Journal of Cleaner Production*, 258 (2020) 120578
- [29] P. Ziolkowski, M. Niedostatkiewicz, Machine learning techniques in concrete mix design, *Materials*, 12(8) (2019) 1256.
- [30] E.M. Golafshani, A. Behnood, Estimating the optimal mix design of silica fume concrete using biogeography-based programming, *Cement and Concrete Composites*, 96 (2019) 95-105.
- [31] O. Sengul, M.A. Tasdemir, Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag, *Journal of materials in civil engineering*, 21(9) (2009) 494-501.
- [23] H.S. Müller, M. Haist, M. Vogel, Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime, *Construction and Building Materials*, 67 (2014) 321-337.
- [24] B. Chiaia, A.P. Fantilli, A. Guerini, G. Volpatti, D. Zampini, Eco-mechanical index for structural concrete, *Construction and Building Materials*, 67 (2014) 386-392.
- [25] E.R. Grist, K.A. Paine, A. Heath, J. Norman, H. Pinder, The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes, *Journal of Cleaner production*, 93 (2015) 26-37
- [26] P. Pineda, A. García-Martínez, D. Castizo-Morales, Environmental and structural analysis of cement-based vs. natural material-based grouting mortars. Results from the assessment of strengthening works, *Construction and Building Materials* 138 (2017) 528-547
- [27] K. Wille, C. Boisvert-Cotulio, Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 86 (2015) 33-43.
- [28] H. Naseri, H. Jahanbakhsh, P. Hosseini, F.M. Nejad,

### پیوست

الف) داده‌های بتن معمولی

ب) داده‌های بتن شامل خاکستر بادی

ج) داده‌های مربوط به بتن شامل سرباره

د) داده‌های مربوط به بتن حاوی سرباره و خاکستر بادی

مقاومت فشاری	سن	سنگدانه ریز	سنگدانه درشت	فوق روان کننده	آب	سیمان
مگاپاسکال	روز	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب
79.99	28.00	676.00	1040.00	2.50	162.00	540.00
61.89	28.00	676.00	1055.00	2.50	162.00	540.00
39.29	28.00	594.00	932.00	0.00	228.00	475.00
52.91	90.00	670.00	932.00	0.00	228.00	380.00
42.62	180.00	594.00	932.00	0.00	228.00	475.00
52.52	365.00	670.00	932.00	0.00	228.00	380.00
53.30	270.00	670.00	932.00	0.00	228.00	380.00

سیمان	سرباره	آب	فوق روان کننده	سنگدانه درشت	سنگدانه ریز	سن	مقاومت فشاری
کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	روز	مگاپاسکال
222.36	96.67	189.29	4.46	967.08	870.32	3.00	11.58
222.36	96.67	189.29	4.46	967.08	870.32	14.00	24.45
222.36	96.67	189.29	4.46	967.08	870.32	28.00	24.89
222.36	96.67	189.29	4.46	967.08	870.32	56.00	29.45
222.36	96.67	189.29	4.46	967.08	870.32	100.00	40.71
233.81	94.58	197.89	4.57	947.04	852.16	3.00	10.38
233.81	94.58	197.89	4.57	947.04	852.16	14.00	22.14

سیمان	سرباره	آب	فوق روان کننده	سنگدانه درشت	سنگدانه ریز	سن	مقاومت فشاری
کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	روز	مگاپاسکال
332.50	142.50	228.00	0.00	932.00	594.00	270.00	40.27
332.50	142.50	228.00	0.00	932.00	594.00	365.00	41.05
198.60	132.40	192.00	0.00	978.40	825.50	360.00	44.30
266.00	114.00	228.00	0.00	932.00	670.00	90.00	47.03
380.00	95.00	228.00	0.00	932.00	594.00	365.00	43.70
380.00	95.00	228.00	0.00	932.00	594.00	28.00	36.45
266.00	114.00	228.00	0.00	932.00	670.00	28.00	45.85

سیمان	سرباره	آب	فوق روان کننده	سنگدانه درشت	سنگدانه ریز	سن	مقاومت فشاری
کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر مترمکعب	روز	مگاپاسکال
167.95	42.08	163.83	121.75	5.72	1058.70	3	7.75
167.95	42.08	163.83	121.75	5.72	1058.70	14	17.82
167.95	42.08	163.83	121.75	5.72	1058.70	28	24.24
167.95	42.08	163.83	121.75	5.72	1058.70	56	32.85
167.95	42.08	163.83	121.75	5.72	1058.70	100	39.23
213.72	98.05	24.51	181.71	6.86	1065.80	3	18.00
213.72	98.05	24.51	181.71	6.86	1065.80	14	30.39

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم  
 Ehsani M., Naseri H., Saedi Nezhad R., Etebari Ghasbeh M. A., Moghadas Nejad F., Compressive strength prediction of ordinary concrete, fly ash concrete, and slag concrete by novel techniques and presenting their optimal mixtures, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4105-4124.  
 DOI: [10.22060/ceej.2020.17649.6631](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17649.6631)

