

Evaluation of parametric study of mixture proportions on the tensile strength regression-based model of concrete containing recycled construction waste

Mohammad Javad Taheri Amiri^{1*}, Amin Ghffari², Ali Ashrafian³

1- Assistant Professor, Higher Education Institute of Pardisan, Mazandaran, Iran

2- M. Sc. Student, Department of Civil Engineering, Tabari university, Babol, Iran

3- M. Sc. Department of Civil Engineering, Tabari university, Babol, Iran

ABSTRACT

Restricting resources and maintaining environmental quality has inevitably required the recycling of materials. Concrete is one of the most attractive building materials for recycling. The waste concrete can be crushed again, used as aggregate in the manufacture of concrete. In this study, for the modeling of compressive strength of concrete containing recycled aggregate, two formula-based regression methods named multivariate adaptive regression splines (MARS) was used. Mixing data from the research background to create suggested models, 239 laboratory data was compiled to estimate tensile strength of recycled concrete for parametric investigation. Then, two scenarios based on volumetric/weighted and ratio variables were defined to determine the best input parameters for the model using mallow's technique. Among which a scenario including volumetric/weighted content, based on three statistical error indices including correlation coefficient (R), Root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) were selected as the best scenario. In this study, to determine the best model for estimating the compressive strength of recycled concrete by means of error statistics, it was determined that the correlation coefficient (R) in the training stage for MARS 0.973 and 0.903. Also. The RMSE statistical value for the proposed model MARS this stage was 16.176. In the testing phase, the MARS method was better than the M5p method. The results of uncertainty analysis indicated that the proposed method had a predicted mean error with very little distance in the semester. In addition, among the proposed smart methods, the MARS base on volumetric/weighted content approach was chosen for parametric analysis.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 September 2020

Revise Date: 29 October 2020

Accept Date: 05 February 2021

Keywords:

Regression-based methods

Tensile strength

Recycled aggregate concrete
(RAC)

MARS method

Parametric analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.248040.2237>

*Corresponding author: Mohammad Javad Taheri Amiri

Email address: jvd.taheri@gmail.com

ارزیابی پارامتریک طرح اختلاط در مدل مقاومت کششی مبتنی بر روش های هوشمند رگرسیونی در بتن تولید شده با ضایعات ساختمانی بازیافت شده

محمد جواد طاهری امیری^{۱*}، امین غفاری^۲، علی اشرفیان^۳

۱- استادیار، موسسه آموزش عالی پردیسان، فریدونکنار، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی و مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی طبری بابل

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی و مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی طبری بابل

چکیده

محدود بودن منابع و حفظ کیفیت محیط زیست لزوم بازیافت مواد و مصالح را اجتناب ناپذیر ساخته است. یکی از مصالح ساختمانی که پتانسیل خوبی برای بازیافت دارد بتن می باشد. بتن ضایعاتی را می توان دوباره خرد نموده، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده کرد. در این مطالعه، برای مدلسازی مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی از روش رگرسیونی مبتنی بر فرمول به نام اسپلین رگرسیونی چند متغیره تطبیقی (MARS) استفاده شد. داده های طرح اختلاط از پیشینه تحقیق برای ایجاد مدل های پیشنهادی، ۲۳۹ داده آزمایشگاهی بود که در جهت برآورد مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی سنگدانه های بازیافتی جمع آوری شد. سپس برای تعیین بهترین پارامترهای ورودی به مدل، دو سناریو با ورودی وزنی حجمی مبتنی بر وزن کیلوگرم مقادیر طرح اختلاط و نسبتی تعریف شد. در این پژوهش، برای تعیین بهترین مدل برای تخمین مقاومت کششی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی از طریق شاخص های آماری خطا، مشخص گردید که ضریب همبستگی (R) در مرحله آموزش برای روش MARS بر پایه به ترتیب ۰/۹۷۳ و ۰/۹۰۳ می باشد. در مرحله تست نیز، مدل وزنی حجمی با ریشه میانگین خطا ۰/۲۳۲ مگاپاسکال خطای بهتری را گزارش نموده و عملکرد بهتری نسبت به مدل نسبتی (۰/۳۳۱ مگاپاسکال) برخوردار بود. نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت و اعتبارسنجی نشانگر آن بود که روش های پیشنهادی با اعتبار لازم را داشته و نتایج تخمین تصادفی نبوده است. همچنین دو نوع رابطه محاسباتی ماریس ارائه شده با رویکرد غیرخطی و ناپارامتریک پیشنهاد شده که در محدوده مطالعاتی این پژوهش مطالعه وزنی حجمی دقت مناسبی داشته و ارزیابی پارامتریک طرح اختلاط بتن بازیافتی با استفاده از رابطه توسعه داده شده وزنی حجمی انجام شد.

کلمات کلیدی: روش های هوشمند رگرسیونی، مقاومت کششی، بتن بازیافت شده، روش ماریس، ارزیابی پارامتریک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.248040.2237	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2021.248040.2237	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۱/۱۷	۱۳۹۹/۱۱/۱۷	۱۳۹۹/۰۸/۰۸	۱۳۹۹/۰۶/۲۳
محمد جواد طاهری امیری jvd.taheri@gmail.com				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه استفاده از بتن های بازیافتی به یکی از مهم ترین مسائل تبدیل شده است و اقتصاد توجه زیادی به استفاده از بتن با دانه بندی بازیافتی (RAC) دارد. تخمین زده شده است که نزدیک به ۱۵۰ میلیون تن قلوه سنگ برای شن و ماسه بتن سالیانه در ایالات متحده تولید می شود و به مصرف می رسد. حال اگر این حجم بالای مصالح سنگی می توانست از مصالح گذشته بازیافت شود دیگر معادن شن و ماسه به سرعت رو به کاهش نمی رفت [۱]. بنابراین استفاده از بتن سازه های فرسوده جهت ساختن بتن با دانه بندی بازیافتی شاید نتوان که به طور کامل در نگه داشتن ذخایر و منابع طبیعی کمک کند ولی می تواند از هدر رفتن یک حجم بزرگی از این منابع خدادادی کمک کند. همچنین استفاده از بتن های RAC به تخریب نشدن محیط زیست نیز کمک بزرگی خواهد کرد [۲]. امروزه با توجه به رشد جمعیت و پیشرفت صنعت، نیاز به ساخت و ساز در کشور ایران افزایش یافته است. این ساخت و سازها منجر به تخریب ساختمان ها و بناهای قدیمی و به وجود آمدن حجم عظیمی از زباله های ساختمانی شده است. همچنین عوامل طبیعی همچون سیل و زلزله، حجم زیادی از زباله های ساختمانی را تولید می کند، از طرفی بسیاری از مواد زباله زوال ناپذیرند و برای صدها و شاید هزاران سال در محیط زیست باقی خواهند ماند [۳]. زباله های زوال ناپذیر با افزایش جمعیت و نیز انباشته شدن زباله در سر تا سر جهان موجب بحران زیست محیطی گردیده اند. بسیاری از این مواد بطور انباشته در محل دفن زباله یا در حاشیه شهر رها می شوند. روابط و مدل های مختلف جهت بررسی و ارزیابی رفتار بتن در گذشته ارائه شده است که همگی مربوط به بتن های متداول بوده است و به همین دلیل در مورد بتن بازیافتی از دقت و قابلیت اعتماد کافی برخوردار نیستند [۴]. استفاده از مدل ها به جهت صرفه جویی در زمان و هزینه ساخت و رفع محدودیت های زیست محیطی روز به روز در حال گسترش می باشد.

در دهه های اخیر، استفاده از روش های هوشمند مصنوعی نظیر، شبکه های عصبی مصنوعی، ماشین های بردار پشتیبان، روش عصبی استنتاجی فازی و روش های مبتنی بر دسته بندی داده ها برای مدل سازی و پیش بینی مسائل مهندسی عمران به علت مزایای قابل تامل آن بسیار فراگیر شده است. عبد و عبد [۵] در پژوهشی بر روی مقاومت فشاری بتن فوم (بتن سبک) با استفاده از روش های کامپیوتری نرم پرداختند. ایشان از روش ماشین های بردار پشتیبان با چهار تابع خطی، سیگموئید، شعاعی پایه و چند جمله ای پیش-بینی مقاومت فشاری بیست و هشت روزه در این نوع بتن استفاده نمودند. ۱۵۰ داده آزمایشگاهی با نسبت آب به سیمان ۰,۳ تا ۰,۴۵ برای توسعه مدل SVM بهره گرفته شد. نتایج تحلیلی مولفه های خطا در هر چهار تابع مورد بررسی شده نشان می دهد ارائه مدل مبتنی بر تابع شعاعی و چند جمله ای SVM با شاخص همبستگی به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۷ نسبت به تابع خطی و سیگموئید عملکرد موفق تری را نشان داده اند. دووان و همکاران [۶] در تحقیق خود برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه بازیافتی از شبکه های عصبی مصنوعی استفاده کرده اند. ایشان اطلاعات مورد نیاز برای مدل سازی را از ۱۷ مقاله مختلف جمع آوری کرده و برای ارزیابی عملکرد مدل ها از معیارهای ریشه متوسط مجذور خطا، ضریب همبستگی و متوسط درصد خطای مطلق استفاده کرده است. در این تحقیق از شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شده و برای تعیین بهترین مدل شبکه عصبی، مدل های مختلفی ساخته و ارزیابی شده است. اشرفیان و همکاران [۷] با استفاده از پنج روش هوشمند مصنوعی یعنی مدل درخت، مارس، ماشین های بردار پشتیبان، شبکه های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه، به پیش بینی مقاومت فشاری و سرعت التراسونیک بتن های الیافی پرداختند. داده های آزمایشگاهی برای مقاومت فشاری و تست التراسونیک به ترتیب ۱۷۵ و ۱۳۲ بوده است. نتایج نشان داد که روش مارس برای هر دو پارامتر خروجی یعنی مقاومت فشاری و سرعت تست التراسونیک عملکرد بهتری داشته است. آسترینس و همکاران مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن خودمتراکم حاوی متاکائولن را با استفاده از دو روش مارس و مدل درخت پیش بینی کردند و در آخر برای مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه پیشنهادی، روابطی را ارائه دادند. در این تحقیق، سیمان، متاکائولن، خمیر سیمان، فوق روان کننده، درشت دانه، ریزدانه و بزرگترین قطر سنگدانه به عنوان

پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است. آنها برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی خود از چند شاخص آماری خطا نظیر ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا استفاده نمودند. از نتایج مدل‌سازی تحقیق آنها نشان داد که روش مارس نسبت به روش مدل درخت از عملکرد بهتری برخوردار بوده است [۸]. گل‌افشانی و همکاران با به کارگیری پارامترهای طرح اختلاط، به پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ بتن بازیافتی و بتن پرتلند پرداختند. ایشان با ترکیب الگوریتم فرا ابتکاری گرگ خاکستری و روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و انفیس مدل‌های بهینه شده رگرسیونی توسعه داده‌اند. در این مطالعه با بررسی تعداد نرون در لایه مخفی ارزیابی مدل برگزیده انجام و شبکه‌های عصبی و انفیس منتخب با استفاده از شاخص‌های خطا معرفی گردید [۹]. داو و همکاران مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر حاوی پوزولان‌های طبیعی را با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و شبکه عصبی استنتاجی فازی مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان با تحقیق آزمایشگاهی داده‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه به تعداد ۲۱۰ مورد در محدوده ۲۵-۴۵ مگاپاسکال را تولید کرده و سپس با ابزار هوش مصنوعی مدل‌های محاسباتی پیشنهاد نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد مدل توسعه داده شده روش عصبی استنتاجی فازی با میانگین خطای مطلق ۱/۶۵۵ مگاپاسکال عملکرد بهتری در مقایسه با شبکه عصبی با میانگین خطای مطلق ۱/۹۸۹ داشته است [۱۰].

مدل‌های که به این منظور جهت پیش‌بینی هزینه‌ها آموزش داده می‌شوند، از آنها جهت پیش‌بینی‌های مهندسی استفاده کرد و همچنین با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به اقتصادی‌ترین حالت رسید. مدل‌های کلاسیک هوشمند فوق‌الذکر گرچه ابزار قدرتمندی برای تخمین مقادیر بتن می‌باشند اما توانایی فرموله کردن و ارائه روابط محاسباتی را جهت پیش‌بینی مقادیر ندارند. از این رو، به جهت اهمیت ارائه روابط و مدل‌های رگرسیونی جهت محاسبه مقادیر اهمیت استفاده از روش‌هایی جدید با توانایی تخمین مناسب و ارائه روابط از پیش‌بینی خروجی مدل نمایان بوده است. هدف اصلی در این مطالعه ارائه مدل‌های داده‌مبنای مبتنی بر روابط محاسباتی با استفاده از روش اسپلاین رگرسیونی اسپلاین رگرسیونی چندمتغیره تطبیقی (مارس) جهت تخمین و پیش‌بینی مقاومت کششی بتن سازگار با محیط زیست حاوی ضایعات بتنی بازیافت شده می‌باشد. همچنین تغییرات بررسی شده در مدل‌های توسعه داده شده با استفاده از تحلیل پارامتریک نیز مورد بررسی قرار گرفته و اثرگذاری هرکدام مشخص گردید.

۲- روش شناسی

اسپلاین رگرسیونی چندمتغیره تطبیقی یا مارس، روش رگرسیونی غیر خطی و ناپارامتریک است که اولین بار توسط فریدمن معرفی شد. مارس، پاسخ‌های غیرخطی را بین ورودی‌ها و خروجی یک سیستم به وسیله مجموعه‌ای از قطعه‌های خطی تکه‌ای (کثیرالجزء‌های چند قطعه‌ای^۱) با گرادین‌های متفاوت مدل‌سازی می‌کند. فرضی ثابت درباره رابطه تابعی اساسی بین متغیرهای ورودی و خروجی لازم نیست. نقاط انتهایی این قطعه‌ها، گره نامیده می‌شوند. گره، انتهای یک ناحیه از داده‌ها و ابتدای ناحیه‌ای دیگر از داده‌ها را مشخص می‌کند. منحنی‌های قطعه‌ای منتج (شناخته شده به عنوان توابع پایه)، انعطاف‌پذیری بیشتری را به مدل می‌دهند و نیز انحناها، آستانه‌ها و دیگر انحراف‌های حاصل از توابع خطی را در نظر می‌گیرند [۱۱]. روش مارس، توابع پایه را با جست‌وجو به روش مرحله‌ای ایجاد می‌کند. الگوریتم رگرسیون انطباقی^۲، برای انتخاب موقعیت‌های گره به کار می‌رود. مدل‌های مارس، به روش دو مرحله‌ای ایجاد می‌شوند. مرحله اول، توابع را جمع می‌بندند و گره‌های احتمالی را برای بهبود عملکرد می‌یابند، که به مدلی با برآزش کامل می‌انجامد (مرحله مقدم). مرحله دوم، دربرگیرنده حذف کمترین جمله‌های حقیقی است (مرحله موخر).

¹ Splines

² Adaptive regression algorithm

فرض کنیم y خروجی تعیین شده و $X = (X_1, \dots, X_p)$ ماتریس متغیرهای ورودی P باشد. پس فرض می‌شود که داده‌ها از مدل «حقیقی» مجهول به وجود می‌آیند. در مورد پاسخ پیوسته این خواهد شد.

$$y = f(X_1, \dots, X_p) + e = f(x) + e \quad (1)$$

که در آن e توزیع خطا است. مارس تابع f را با کاربرد توابع پایه (BFs) تقریب می‌زند. توابع پایه، کثیرالجمله‌های چند قطعه‌ای (چندجمله‌ای‌های نرم)، شامل توابع خطی چندقطعه‌ای و توابع مکعبی چندقطعه‌ای هستند. با توجه به اینکه در این تحقیق، از توابع خطی چندقطعه‌ای استفاده شده است، در ادامه به توضیح این توابع پرداخته خواهد شد.

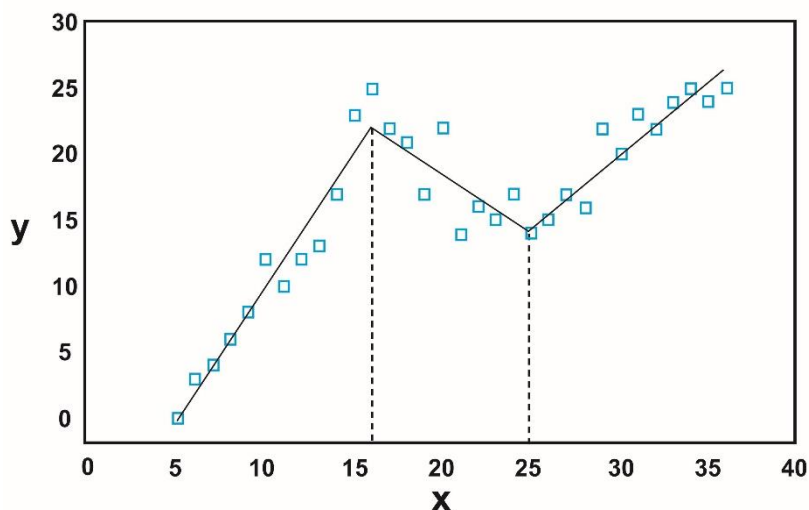
توابع خطی چند قطعه‌ای از نوع $\max(0, x - t)$ با یک گره واقع در مقدار t هستند. معادله $\max(0, x - t)$ ، به معنای آن است که تنها بخش مثبت $(0, x - t)$ مورد استفاده قرار می‌گیرد، در غیر این صورت، آن مقدار صفر می‌شود.

$$\max(0, x - t) \begin{cases} x - t & \text{if } x \geq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

مدل مارس، به عنوان ترکیب خطی BF ها و روابط متقابل آنها ایجاد، و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m \lambda_m(x) \quad (3)$$

λ_m ، پارامتر هموارسازی نامیده می‌شود. هر $\lambda_m(x)$ تابعی پایه است و می‌تواند تابع کثیرالجمله‌ای چندقطعه‌ای، یا حاصلضرب دو تابع کثیرالجمله‌ای چندقطعه‌ای یا بیش‌تر که پیش از این در مدل جا داشت، باشد (مرتبه‌های بالاتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، هنگامی که داده‌ها آن را ایجاب کنند؛ برای سادگی، در این پایان‌نامه حداکثر در مرتبه دوم فرض می‌شود). ضرایب β ثابت هستند، و با استفاده از روش کوچک‌ترین مربعات برآورد می‌شوند. شکل (۱)، مثال ساده‌ای از چگونگی برازش داده‌ها توسط مدل مارس چند قطعه‌ای خطی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: گره‌ها و کثیرالجمله‌های چند قطعه‌ای خطی برای مثال مارس ساده

با توجه به شکل (۱)، معادله ریاضی مارس این مثال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y = 4/4668 + 1/1038 * BF1 - 3/997 * BF2 + 1/967 * BF3 \quad (4)$$

³ Basis Function(s)

که $BF1 = \max(0, x - 16)$ ، $BF2 = \max(0, 16 - x)$ و $BF3 = \max(0, 25 - x)$ هستند. گره‌ها در $x = 16$ و $x = 25$ قرار می‌گیرند. آنها حدود سه فاصله‌ای که روابط خطی متفاوت را مشخص می‌کنند، معین می‌کنند. مدل‌سازی مارس، فرایند پدید آمده از داده‌ها است. برای برازش مدل در معادله (۵)، ابتدا روش انتخابی مقدم روی داده‌های آموزشی انجام می‌شود. مدل، تنها با عرض β_0 و جفت پایه ایجاد می‌شود که بیش‌ترین کاهش را در خطای آموزشی به وجود می‌آورد. با توجه به مدل جاری با توابع پایه M ، جفت بعدی به فرم زیر به مدل اضافه می‌شود:

$$\hat{\beta}_{M+1}\lambda_1(X) \max(0, X_j - t) + \hat{\beta}_{M+2}\lambda_1(X) \max(0, t - X_j) \quad (۵)$$

که هر β با روش کوچک‌ترین مربعات، برآورد می‌شود. چون تابع پایه به فضای مدل اضافه می‌شود، اثرهای متقابل بین BF ها که پیش از این در مدل وجود داشتند نیز مورد توجه قرار می‌گیرند. سپس BF ها اضافه می‌شوند تا مدل به حداکثر تعداد از جمله برسد که به مدلی تعمداً با برازش کامل می‌انجامد. برای کاهش تعداد جمله‌ها، از رشته حذفی موخر پیروی می‌شود. هدف روش حذفی موخر، پیدا کردن مدل نزدیک به حد مطلوب با حذف متغیرهای غیر اصلی است. مسیر موخر توابع پایه همراه با کمترین سهم نسبت به مدل را حذف کرده تا اینکه بهترین زیر مدل را بیابد. بنابراین، توابع پایه حفظ شده در مدل بهینه نهایی، از مجموعه تمام توابع پایه انتخابی انتخاب می‌شوند، که در مرحله انتخابی مقدم مورد استفاده قرار گرفته است. زیرمجموعه‌های مدل با استفاده از روش ارزیابی متقابل تعمیم یافته (GCV)^۴ که به لحاظ محاسباتی کم هزینه است، مقایسه می‌شوند. معادله این آزمون، میزان انطباق است که اعداد بزرگ توابع پایه را تخمین می‌زند و برای کاهش احتمال برازش کامل به کار می‌رود. برای داده‌های آموزشی با N مشاهده، GCV برای مدل به شرح ذیل محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$GCV = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2}{\left[1 - \frac{M+d \times (M-1)/2}{N}\right]^2} \quad (۶)$$

که در آن M تعداد توابع پایه، d پارامتر برآورد، N تعداد مشاهدات است و $f(x_i)$ مقادیر پیش‌بینی شده مدل مارس را مشخص می‌کند. صورت کسر، خطای میانگین مربعات مدل مورد ارزیابی در داده‌های آموزشی است، که به وسیله صورت کسر برآورد می‌شود. صورت کسر، واریانس صعودی را در مورد افزایش پیچیدگی مدل در نظر می‌گیرد. لازم به ذکر است که $(M-1)/2$ تعداد گره‌های تابع مبنا است. ارزیابی متقابل تعمیم‌یافته، نه تنها تعداد توابع پایه مدل، بلکه تعداد گره‌ها را نیز برآورد می‌کند. در هر مرحله حذفی، تابعی پایه برای کوچک کردن معادله (۳-۴) حذف می‌شود، تا اینکه مدل به قدر کافی برازش شده تشخیص داده شود [۱۱]. مارس روشی انطباقی است، زیرا انتخاب توابع پایه و موقعیت‌های گره متغیر داده محور و خاص مسئله موجود است.

۲-۲- شاخص‌های آماری خطا جهت مقایسه مدل‌ها

برای مقایسه عملکرد مدل‌های ارائه شده در مراحل آموزش و آزمایش، شاخص‌های آماری زیر شامل ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و میانگین خطای مطلق (MAE) در نشان داده شده است که O_i مقدارهای مشاهده‌ای، P_i مقدارهای پیش‌بینی، O^- میانگین داده‌های مشاهده‌ای، P^- میانگین داده‌های پیش‌بینی و M تعداد داده‌ها می‌باشد.

⁴ Generalized Cross Validation

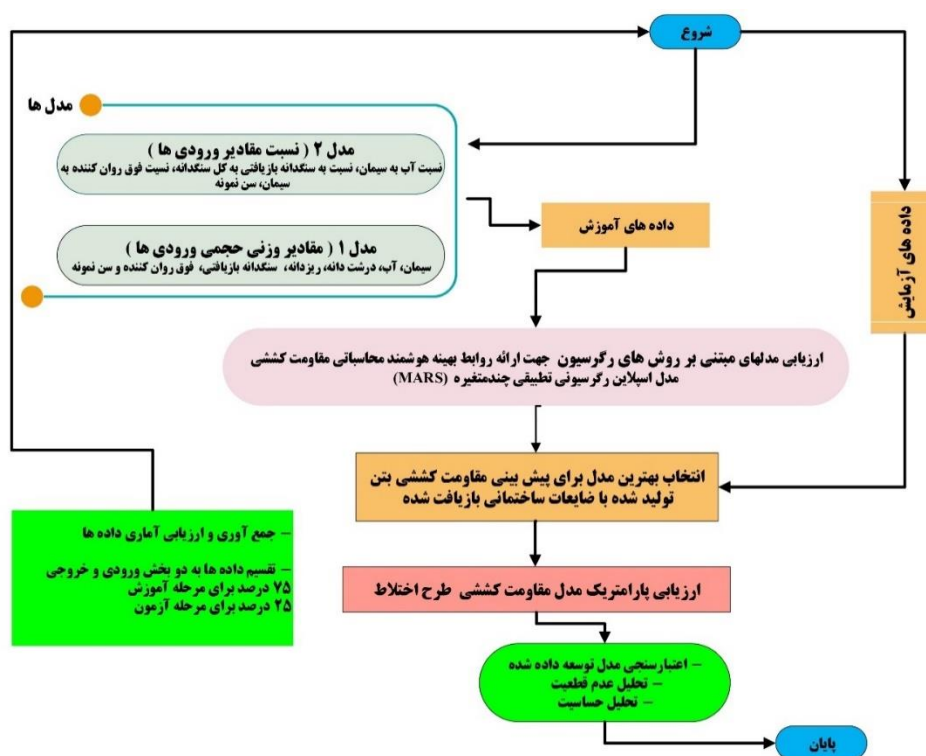
جدول ۱: شاخص های خطای مورد استفاده در این مطالعه

شماره رابطه	(۲)	(۳)	(۴)
رابطه	$R = \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^M (P_i - \bar{P})^2}}$	$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^M (P_i - O_i)^2}{M}$	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M P_i - O_i }{M}$
شماره رابطه	(۷)	(۸)	(۹)

۳- بحث و نتایج

۳-۱- مجموعه داده‌های استفاده شده در این تحقیق

برآورد مقاومت کششی بتن بازیافتی با استفاده از مدل‌های مذکور، نیازمند پایگاه داده آزمایشگاهی جامع است. بدین منظور ۲۳۹ سری داده آزمایشگاهی جهت مدل‌سازی مقاومت کششی بتن حاوی ضایعات بتنی بازیافت شده از پژوهش‌های آزمایشگاهی چاپ شده و معتبر [۱۲-۲۷] جمع‌آوری، که از کل داده‌ها به ترتیب ۷۵٪ (۱۷۹ داده) برای اجرای مراحل آموزش و ۲۵٪ (۶۰ داده) برای اجرای آزمایش در نظر گرفته شده است. شکل (۲) فلوچارت مراحل اجرایی این پژوهش را در طی فرآیند مدلسازی و تحلیل و اعتبارسنجی را نمایش داده است.



شکل ۲: فلوچارت مراحل اجرایی فرآیند مدلسازی در این مطالعه

۳-۲- سناریوهای بررسی شده برای توسعه مدل پیشنهادی

برای انتخاب حالت ورودی بهینه برای توسعه مدل پیشنهادی و ارزیابی مقادیر پارامتریک طرح اختلاط بتن بازیافتی، ۲ سناریو با چینش متفاوت ترکیب ورودی در شرایط مختلف در نظر گرفته شد. در این ارزیابی ۲ تیپ ورودی مختلف مقادیر به صورت وزنی حجمی (با بعد) و نسبت مقادیر به یکدیگر (بی بعد) مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به بیان سناریوها و نتایج آماری مورد بررسی هر کدام پرداخته می‌شود. در این مطالعه، به جهت ارزیابی پارامتریک مقاومت کششی در بتن بازیافتی حاوی ضایعات بتنی بازیافت شده در این پژوهش همان طور که در رابطه (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده شده، تابعی از متغیرهای پیش‌بین در دو سناریو مورد بررسی می‌باشد. بر این اساس، با توجه به رابطه شماره (۴-۱) ورودی‌های پیش‌بین برای توسعه مدل مقاومت کششی (TS) بتن بازیافتی شامل سیمان (C)، آب (W)، ریزدانه (FA)، درشت دانه (CA)، سنگدانه بازیافتی (RA)، فوق روان کننده (SP) و سن نمونه (AS) می‌باشند. در این ترکیب منتخب، واحد سن نمونه بصورت روز و بقیه متغیرهای ورودی کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند.

$$TS = f(C, W, CA, FA, RA, SP, AS) \quad (10)$$

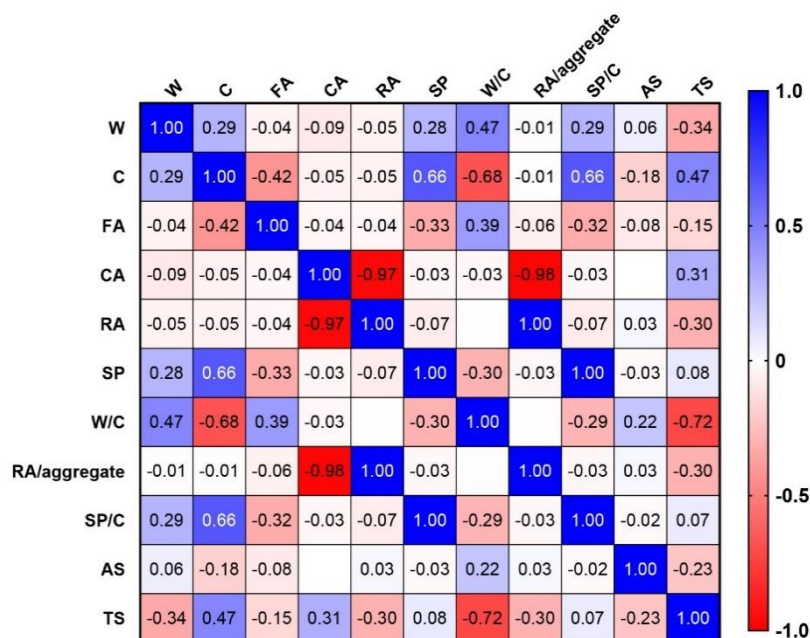
همچنین برای سناریو شماره دو نیز ترکیب ورودی نسبت مقادیر شامل نسبت آب به سیمان (W/C)، نسبت سنگدانه بازیافتی به کل سنگدانه مصرفی در طرح اختلاط ($RA/Aggregate$)، نسبت فوق روان کننده به سیمان (SP/C) و سن نمونه (AS) مورد بررسی بوده است. در این ترکیب منتخب، واحد سن نمونه بصورت روز و بقیه متغیرهای بی بعد شده با نسبت مقادیر بدون مواحد می‌باشند.

$$TS = f\left(\frac{W}{C}, \frac{RA}{Aggregate}, \frac{SP}{C}, AS\right) \quad (11)$$

بعد از انتخاب بهینه‌ترین متغیرهای ورودی، متغیرهای توسعه‌دهنده مدل‌ها، در این بخش این داده‌ها به لحاظ آماری مورد بررسی بیشتر قرار داده شده است. برای این منظور، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، میانگین داده‌های مورد مطالعه، بررسی و تحلیل شد که در جدول (۲) گزارش داده شده است. مفهوم انحراف معیار از شاخص‌های پراکندگی است که نشان‌دهنده مقدار فاصله میانگین داده‌ها از مقدار متوسط است که هرچه به صفر نزدیکتر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. بر این اساس، داده‌های جمع آوری شده در این مطالعه در محدوده مورد بررسی، پراکندگی قابل توجهی داشته و فرایند مدلسازی را تسهیل کرده‌اند. همچنین شکل (۳) همبستگی متغیرهای ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر را با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون نشان می‌دهد. در این پایگاه داده جمع آوری شده و با بررسی همبستگی در تحلیل پیرسون به جز متغیرهای درشت دانه و سنگدانه بازیافتی که همبستگی بالایی داشتند بقیه متغیرها همبستگی قابل قبولی برای پردازش و اجرای فرایند توسعه مدلی داشته‌اند. علت همبستگی بالا در دو متغیر اشاره شده نیز به علت جایگزین درشت دانه بازیافتی به جای بخشی از درشت دانه در طرح اختلاطها بوده است.

جدول ۲: تحلیل آماری متغیرهای ورودی و خروجی در دو سناریو

متغیرها	مقدار حداقل	مقدار حداکثر	میانگین	انحراف معیار
آب	۱۲۰	۲۴۰	۱۸۵/۵۲	۲۵/۸
سیمان	۲۷۵	۷۵۰	۳۸۹/۸۶	۸۲/۴
ریزدانه	۳۶۵	۱۰۰۵/۱۸	۷۱۷/۲۸	۶۶/۸۸
درشت دانه	۰	۱۳۶۶	۵۸۲/۸	۴۳۶/۲
سنگدانه بازیافتی	۰	۱۱۵۰	۴۸۸	۴۰۷/۳
فوق روان کننده	۰	۱/۶۸	۱/۳۳	۱۸/۲۶
نسبت آب به سیمان	۰/۳	۰/۶۸۳	۰/۴۸۱	۰/۰۹۲
نسبت سنگدانه بازیافتی به کل سنگدانه مصرفی	۰	۰/۶۶۱	۰/۲۷۶	۰/۲۳۱
نسبت فوق روان کننده به سیمان	۰	۰/۱۷۳	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵
سن نمونه	۷	۱۸۰	۳۴/۵۸	۳۹/۷۶
مقاومت کششی	۱/۹	۶/۲۴	۳/۶۲۴	۰/۹۳۳

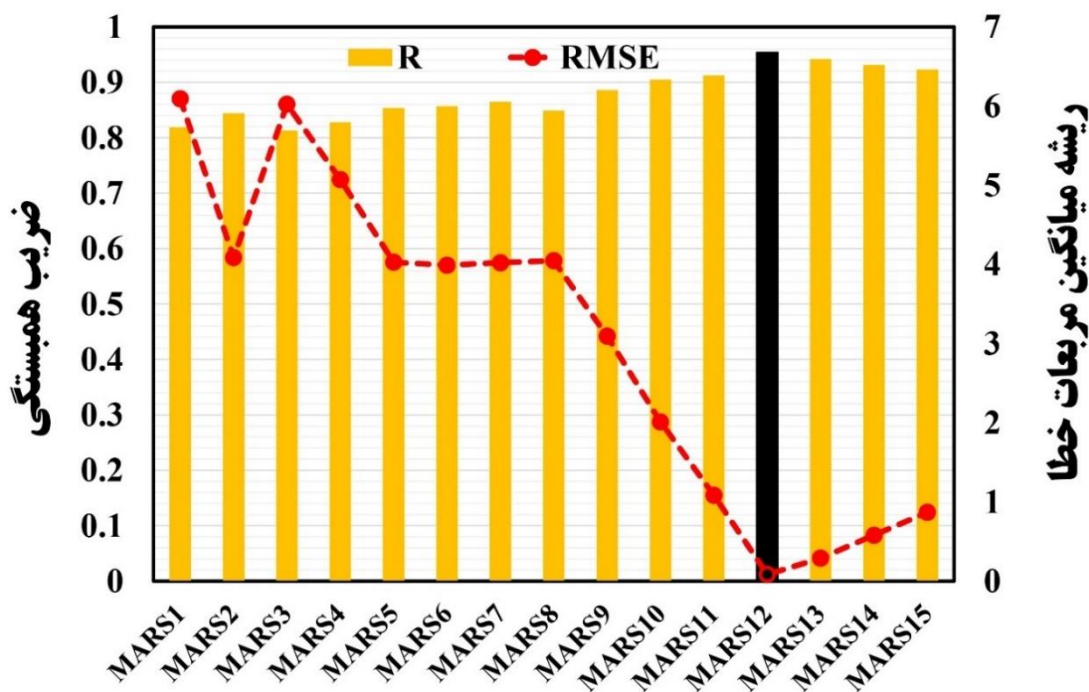


شکل ۳: همبستگی متغیرهای ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر

۳-۳ - توسعه مدل های هوشمند محاسباتی مبتنی بر سناریوهای انتخاب شده

• سناریو شماره یک (مقادیر وزنی حجمی متغیرهای بررسی شده)

برای آموزش و آزمایش مدل ها به ترتیب از ۷۵ درصد (۱۷۹ عدد) و ۲۵ درصد (۶۰ عدد) داده جمع آوری شده استفاده شده است؛ به جهت ارزیابی اثرگذاری پارامترهای مدل مارس (بیشترین مقدار تابع پایه، بیشترین مقدار عکس العمل توابع و پارامتر جریمه) و بررسی آنها به روش آموزش و خطا بررسی گردید. برای این منظور ۷۰ مدل داده مبنا با تغییر مقادیر ارزیابی گردید که در این بخش ۱۵ مدل برگزیده در مرحله آزمایش در شکل (۴) بررسی شده است. ملاک تعیین مدل نهایی، عملکرد آن در مرحله آزمایش می باشد. لازم به ذکر است که با هر بار آنالیز مدل مارس در نرم افزار متلب، مقادیر مختلفی از پیش بینی با توجه به مقادیر پارامترها ارائه شد؛ در نتیجه با هر بار آنالیز جواب متفاوتی حاصل می گردد. مدل مارس توسعه داده شماره ۱۲ بهترین مدل توسعه یافته بوده و به عنوان مدل نهایی انتخاب شده است. در این مطالعه، مدل بهینه دارای مقدار تابع پایه ۰/۲۵، بیشترین مقدار پارامتر اندرکنش ۲ بوده است. همان گونه که در شکل ارائه شده قابل استنباط است، مدل مارس ۱۲ با ضریب همبستگی ۰/۹۵۴ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۸۴ بهترین نتایج را در برداشته است. زمان پردازش مدل مارس در تحلیل محاسباتی این سناریو ۳۶ / ۸ ثانیه و زمان تشکیل ساختار مدل ۶۹ / ۰ ثانیه می باشد.



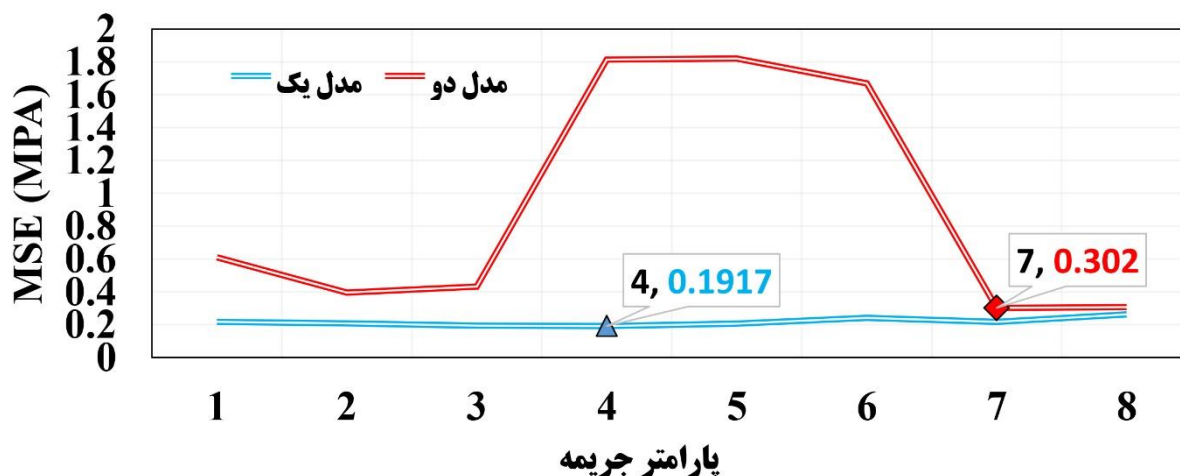
شکل ۴: معیارهای ارزیابی مدل مارس

• سناریو شماره دو (نسبت متغیرها)

جهت بررسی سناریو دوم نیز با مشارکت ۷۵ درصد داده ها برای آموزش مدل و ۲۵ درصد جهت اعتبارسنجی و ارزیابی گردید. در این ارزیابی، با بی بعد سازی متغیرهای طرح اختلاط مدل داده مبنا با رویکرد نسبت مقادیر توسعه داده شد. نتایج نشان داد مدل منتخب با تعداد ۱۲ تابع پایه و مقدار پارامتر اندرکنش ۲ با ضریب همبستگی ۰/۹۰۳ در مرحله آموزش و ۰/۹۰۲ در مرحله آزمایش دقت قابل توجهی را نمایش داده است. لازم به ذکر است برای انتخاب مدل منتخب با رویکرد آزمون و خطا در انتخاب پارامترهای بهینه مدل مارس ۷۰ مدل توسعه داده شده بود که مدل نهایی با پارامترهای فوق الذکر بهترین عملکرد را نمایش داده است.

• روابط محاسباتی مدل مارس جهت تخمین مقاومت کششی بتن بازیافتی

جدول شماره (۳) جزییات تحلیلی روش مارس شامل نوع توابع پایه مورد استفاده، تعداد آنها و بیشترین مقدار عکس العمل هر تابع را بررسی کرده است. برازش در هر تابع پایه بصورت جداگانه صورت پذیرفته و رابطه مربوط به این برازش ارائه شده است. متغیرها و محل های گره برای هر متغیر، از طریق روش جست و جوی سریع اما متمرکز تعیین می شوند. همچنین انتخاب مقدم و روش حذفی موخر، به عنوان تضمین کننده مدل بهینه تشخیص داده می شود. یکی از مزیت های روش مارس، سرعت همگرایی آن است. که در زمان پردازش آن مشهود است. شبکه های عصبی به لحاظ ساختار الگوریتم، به خاطر کارآمد نبودن در انجام سریع محاسبات، به دلیل فرایند طولانی تعیین پیکربندی شبکه بهینه، مورد انتقاد قرار گرفته است، چرا که این الگوریتم از راه قیاس شناخته نمی شود، بلکه از طریق رویکرد آزمون و خطا تعیین می شود [۱۱]. از این رو، روش مارس به عنوان روشی با پردازش سریع در این پژوهش مورد توجه بوده است. همچنین، شکل (۵) میزان خطای میانگین برای انتخاب بهترین پارامتر جریمه (C) در مدل مارس را نمایش داده است. در این مطالعه پارامتر جریمه بصورت پیش فرض پیشنهادی بین ۱-۸ در نظر گرفته شد که مقدار بهینه $C_{best}=4$ ($MSE=0.1917$) برای مدل برگزیده در سناریو یک و مقدار بهینه $C_{best}=7$ ($MSE=0.302$) برای مدل برگزیده در سناریو دوم از طریق کمینه کردن خطا با استفاده از روش کمترین مربعات خطا بدست آمد.



شکل ۵: ارزیابی پارامتر جریمه در مدل های توسعه داده شده مارس

جدول ۳: جزییات روش مارس برای پیش بینی مقاومت کششی

مقاومت فشاری	خروجی مدل
چند قطعه ای خطی	نوع توابع پایه
۹۰-۱۰	تعداد توابع پایه
۴-۲	بیشترین مقدار اندرکنش

جدول (۴)، توابع پایه و معادلات متناظر هرکدام را برای دو سناریو بررسی شده مشخص کرده است. این توابع و روابط ارائه شده مربوط، به منظور انتخاب بهترین مدل و رابطه نهایی بهینه از خروجی مورد نظر با توجه به رابطه مارس (رابطه ۳) ارائه شده است.

جدول ۴: توابع پایه توسعه داده شده مارس برای پیش‌بینی مقاومت کششی

سناریو شماره یک	سناریو شماره دو
BF1 = max(0, x2 -485)	BF1 = max(0, 0.5493 -x1)
BF2 = max(0, 485 -x2)	BF2 = max(0, x2 -0.06)
BF3 = max(0, x1 -213.2)	BF3 = max(0, x3 -0.00012469)
BF4 = max(0, 213.2 -x1)	BF4 = max(0, x3 -0.00083799)
BF5 = max(0, 187.51 -x5)	BF5 = max(0, 0.00083799 -x3)
BF6 = max(0, x3 -720)	BF6 = max(0, 0.55 -x1)
BF7 = max(0, 720 -x3)	BF7 = max(0, 0.51887 -x1)
BF8 = max(0, x3 -690)	BF8 = BF2 * max(0, x4 -28)
BF9 = max(0, 690 -x3) * max(0, x1 -180)	BF9 = BF2 * max(0, 28 -x4)
BF10 = max(0, 690 -x3) * max(0, 180 -x1)	BF10 = max(0, x1 -0.51887) * max(0, 90)
BF11 = max(0, x5 -187.51) * max(0, 28 -x7)	BF11 = max(0, 0.06 -x2) * max(0, 0.43 -
BF12 = BF7 * max(0, x1 -191.55)	
BF13 = BF7 * max(0, 191.55 -x1)	
BF14 = max(0, 1.38 -x6) * max(0, x3 -765.1)	
BF15 = max(0, 1.38 -x6) * max(0, 765.1 -x3)	
BF16 = BF8 * max(0, x1 -220)	
BF17 = max(0, x7 -28)	
BF18 = max(0, 28 -x7)	
BF19 = max(0, x5 -187.51) * max(0, x3 -72)	
BF20 = max(0, x5 -187.51) * max(0, x2 -40)	
BF21 = BF4 * max(0, 706 -x3)	
BF22 = BF4 * max(0, x3 -697)	
BF23 = BF4 * max(0, 697 -x3)	
BF24 = BF8 * max(0, x5 -216)	

• رابطه مارس ارائه شده برای مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی بتن ضایعاتی بازیافت شده با توجه به سناریو شماره یک مطابق زیر است:

$$TS = -0.374 + 0.006 * BF1 - 0.008 * BF2 - 0.057 * BF3 + 0.005 * BF4 + 0.0007 * BF5 - 0.1881 * BF6 + 0.072 * BF7 + 0.162 * BF8 - 0.003 * BF9 - 0.0078 * BF10 - 1.7215e - 05 * BF11 + 0.002 * BF12 + 0.0011 * BF13 + 0.02 * BF14 + 0.006 * BF15 + 0.0016 * BF16 + 0.0035 * BF17 - 0.017403 * BF18 + 3.2732e - 05 * BF19 - 4.909e - 06 * BF20 + 0.004 * BF21 + 0.0002 * BF22 - 0.0056305 * BF23 - 2.3418e - 05 * BF24 \quad (۱۲)$$

• رابطه مارس ارائه شده برای مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی بتن ضایعاتی بازیافت شده با توجه به سناریو شماره دو مطابق زیر است:

$$TS = -8.984 + 1931 * BF1 - 0.926 * BF2 + 175 * BF3 - 17553 * BF4 + 15602 * BF5 - 1892.6 * BF6 - 32.819 * BF7 + 0.0064 * BF8 - 0.0484 * BF9 - 0.138 * BF10 + 96.325 * BF11 \quad (۱۳)$$

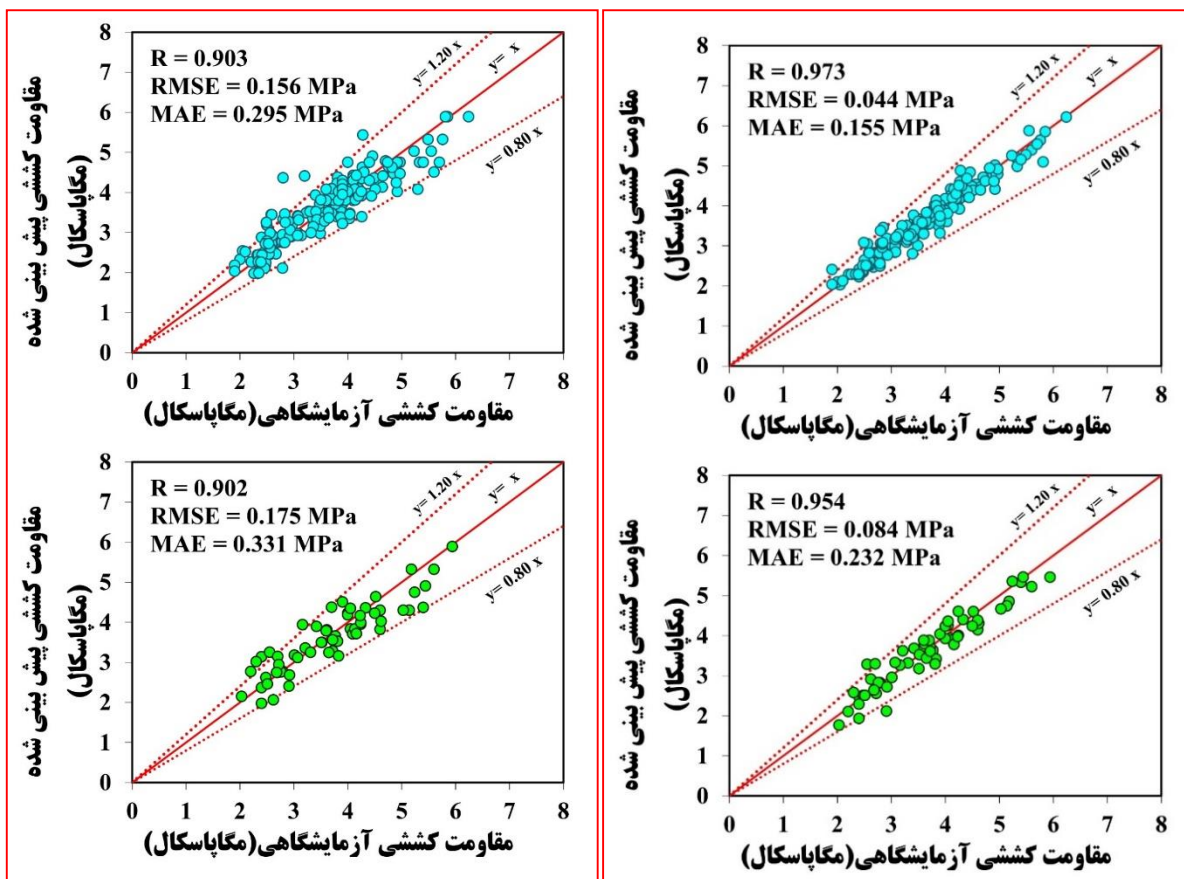
۳-۴ - مقایسه مدل‌های توسعه داده شده پیشنهادی

انجام فرایند تحلیل پارامتریک بر روابط محاسباتی ارائه شده در بخش قبل نیاز به بررسی دقت مدل‌های ارائه شده و انتخاب رابطه کارتر با دقت بهتر جهت ارزیابی پارامتریک مقادیر طرح اختلاط بوسیله آن دارد. برای ارزیابی مدل‌های توسعه داده شده مارس با ورودی-های وزنی حجمی (مدل یک) و نسبت متغیرهای ورودی (مدل دو) بررسی‌های کمی و کیفی انجام شده است. همانطور که جدول (۵) نشان می‌دهد، ضریب همبستگی در مرحله آموزش برای مدل یک و مدل دو به ترتیب ۰/۹۷۳ و ۰/۹۰۳ می‌باشد. همچنین مقدار شاخص آماری RMSE برای مدل پیشنهادی یک و دو در این مرحله به ترتیب ۰/۰۴۴ و ۰/۰۸۴ مگاپاسکال حاصل گردیده است. همچنین شاخص آماری MAE برای مدل یک (۰/۱۵۵) بهتر از مدل دیگر بوده است. بدین ترتیب، شاخص‌های آماری نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی یک از عملکرد خوب و دقت بالایی در مرحله آموزش نسبت به مدل با متغیرهای بی بعد دیگر برخوردار است. در مرحله آزمایش نیز، مدل توسعه داده شده یک با متغیرهای وزنی حجمی با ضریب همبستگی ۰/۹۵۴ و مقادیر RMSE و MAE به ترتیب ۰/۰۸۴ و ۰/۲۳۲ مگاپاسکال دقت قابل توجهی در مقایسه با مدل دیگر داشته است.

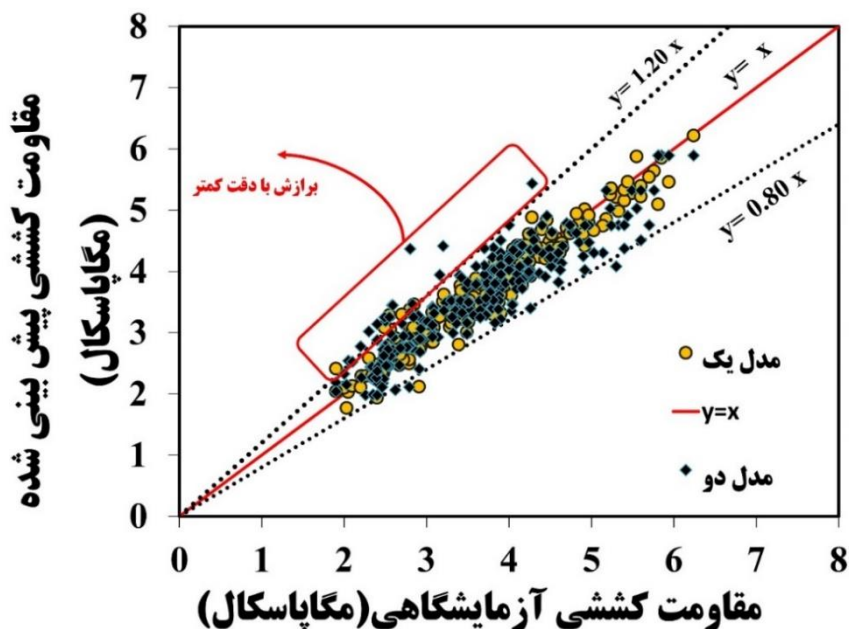
جدول ۵: ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی

مراحل	مدلها	R	RMSE	MAE
آموزش	مدل ۱	۰/۹۷۳	۰/۰۴۴	۰/۱۵۵
	مدل ۲	۰/۹۰۳	۰/۱۵۶	۰/۲۹۵
آزمایش	مدل ۱	۰/۹۵۴	۰/۰۸۴	۰/۲۳۲
	مدل ۲	۰/۹۰۲	۰/۱۷۵	۰/۳۳۱

در این تحقیق، شکل (۶) مقادیر مقاومت کششی مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده نظیر آن توسط مدل وزنی حجمی شماره یک و مدل با نسبت مقادیر شماره دو برای مراحل آموزش و آزمایش نشان می‌دهد. در مرحله آموزش مدل یک دارای خطای کمتر در مقایسه با دیگر مدل مارس پیش‌بینی مقادیر مقاومت کششی بتن بازیافتی از خود نشان داده‌است. در یک مقایسه‌ی کیفی، بیشتر مقدار مقاومت کششی بر روی خط نیمساز معیار ($y=x$) متمرکز هستند و فقط تعداد اندکی از این نقاط خارج از منطقه تمرکز می‌باشند. در ارزیابی مدل‌ها انحراف بیش از ۲۰ درصد در پیش‌بینی نقاط تخمین شده در محدوده ۲-۳ مگاپاسکال برای مدل یک و ۳-۵ مگاپاسکال در مدل دوم مشاهده شده که میزان این انحرافات در مدل دوم به مراتب از مدل یک بیشتر می‌باشد. در این محدوده، پیش‌بینی‌ها عمدتاً بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی بوده، اما با افزایش مقادیر مقاومت کششی دقت مدل‌ها در وضعیت مطلوبی قرار گرفته است. در مجموع مدل‌های توسعه داده شده وزنی حجمی و نسبتی در این مطالعه آموزش مناسبی جهت ارزیابی داشته‌اند. خطای محاسباتی در پیش‌بینی مرحله آزمایش نیز عمدتاً کمتر از ۲۰ درصد و همبستگی مقادیر آزمایشگاهی واقعی و پیش‌بینی شده بیش از ۹۰ درصد بوده است. همچنین شکل (۷) مقادیر مراحل آموزش و آزمایش مدل‌های توسعه داده شده را در قالب یک شکل نمایش داده است. همانطور که در شکل با خط‌چین سیاه مشخص شده، عمدتاً داده‌های با پیش‌بینی ضعیف‌تر (برازش کمتر) در مقادیر اشاره شده دچار بیش تخمین یا کم تخمین شده‌اند. در یک مطالعه کیفی مدل توسعه داده شده با متغیرهای ورودی وزنی حجمی در قیاس با مدل بی بعد نسبت مقادیر متغیرها میزان خطا را کاهش داده است و مدلی کارتر و با دقت بالاتر ارائه نموده است.

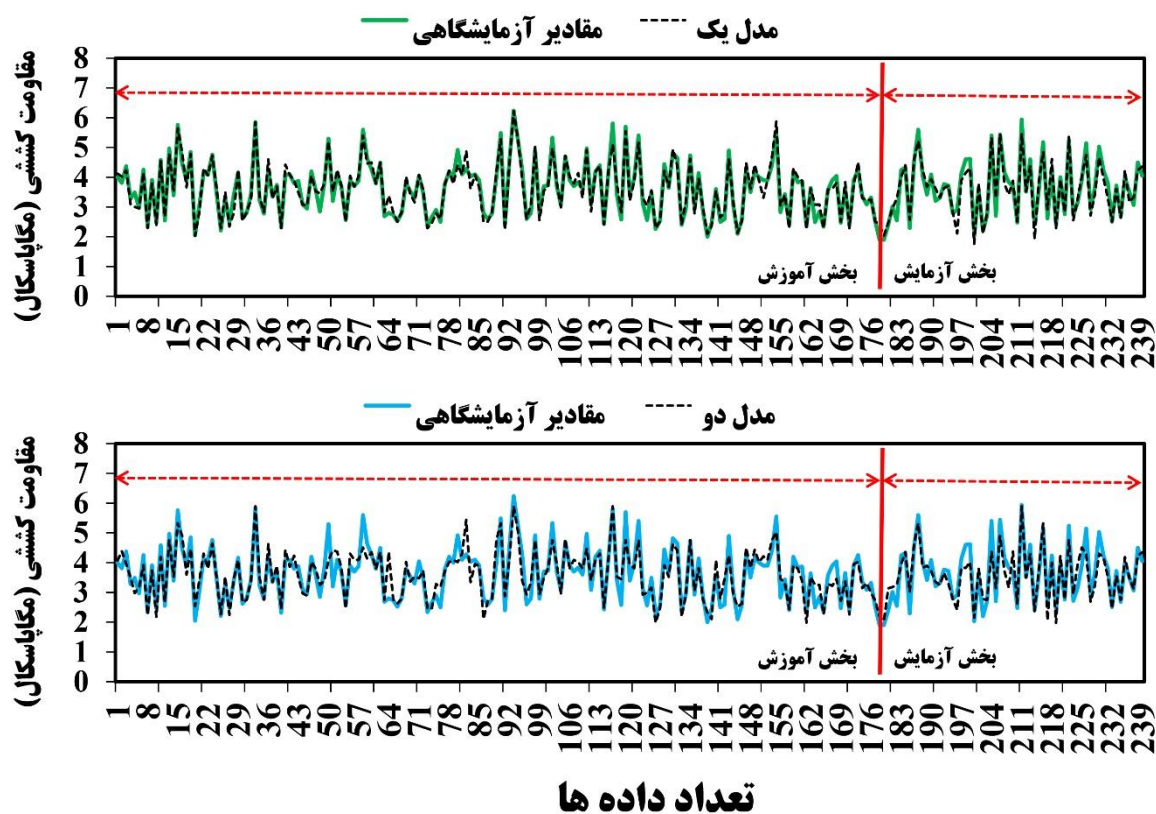


شکل ۶: نمودار پراکندگی مقادیر مقاومت کششی مدل مارس با ورودی های وزنی حجمی و نسبتی؛ آبی: داده های آموزش، سبز: داده های آزمایش



شکل ۷: مقادیر مدل های توسعه داده شده تمامی مدل های پیشنهادی

بر اساس نمودار بازه زمانی^۵، مرحله آموزش و آزمایش که در شکل (۸) نشان داده شده است، پیش‌بینی‌های کمیته و بیشینه‌های محلی مورد تحلیل بهتر قرار می‌گیرد. مدل دو دارای عملکرد نسبتاً ضعیف‌تر در مقایسه با مدل توسعه داده شده شماره یک در این پژوهش بوده است. مدل یک در تخمین بیشینه و کمیته‌های محلی، در مرحله آزمون موفق‌تر عمل کرده‌اند. همچنین بررسی مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر مقاومت کششی، پیش‌بینی بیشینه‌های محلی با خطای بیشتر همراه بوده که این ضعف در مدل دو کاملاً مشهود می‌باشد.

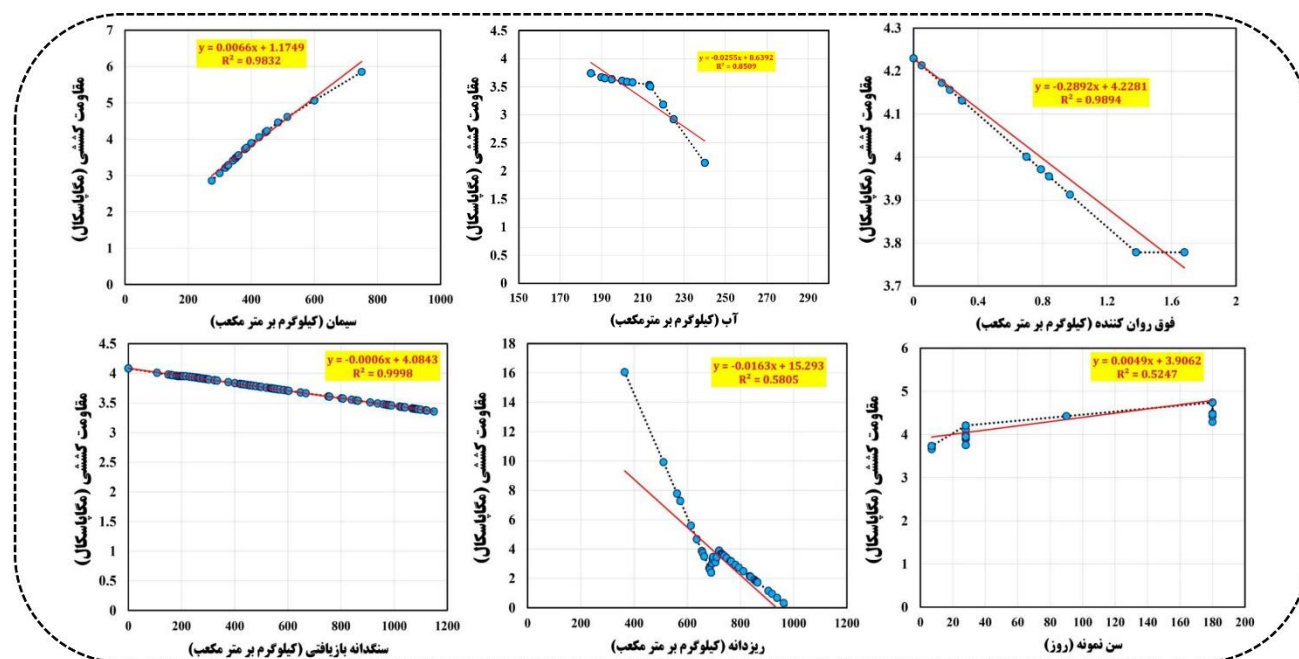


شکل ۸: نمودار بازه زمانی مدل‌های بررسی شده

۳-۵- تحلیل پارامتریک مدل توسعه داده مقاومت فشاری

بعد از بررسی و ارزیابی دو مدل داده مبنای توسعه داده شده، مدل شماره یک به عنوان مدلی با دقت بالاتر جهت انجام فرایند تحلیل پارامتریک برگزیده گردیده است. از این رو با توجه به رابطه ارائه شده برای مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی بتن ضایعاتی بازیافت شده با توجه به سناریو شماره یک (رابطه ۱۰) کدنویسی مجدد در نرم افزار متلب انجام و اثر هر متغیر ورودی با توجه رابطه نهایی توسعه داده شده مارس بررسی گردید. برای این بررسی تمامی مقادیر متغیرهای را براساس میانگین مقادیر هر یک محاسبه و تنظیم کرده و جهت بررسی اثر مشخص هر متغیر، مقادیر واقعی آن را در پایگاه داده ثبت و داده نهایی را با توجه به کدنویسی رابطه (۱۰) در نرم افزار متلب توسعه داده شده است.

⁵ Time Series plot



شکل ۹: تحلیل پارامتریک متغیرهای طرح اختلاط

• اثر آب

مقادیر نتایج بتن تازه و کارآیی بتن با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نشان می‌دهد، اگر سنگدانه بازیافت شده خشک با سطح اشباع بکار گرفته شود به میزان برابری میرسد. همچنین، در صورت استفاده از سنگدانه بازیافتی خشک با اضافه نمودن آب بیشتر کارایی بهتر آن را فراهم نماید. همچنین میزان آب اضافه به کارای مورد انتظار بستگی دارد که مقدار آن را نیز میشود محاسبه نمود. در هر دو مورد با افزودن مصالح بازیافت شده از مقدار خواص مقاومتی و همچنین اسلامپ بتن کاسته می‌شود. در این مطالعه نیز بررسی نشان داد با افزایش میزان آب مقادیر مقاومت کششی متناظر با آن با کاهش مواجه شده است (شکل ۴-۹).

• اثر سیمان

مقاومت کششی بتن تولیدی معمولاً از خواص خمیر سیمان تاثیر می‌گیرد و چندان از مقاومت فشاری سنگدانه پیروی نمی‌کند. در این مطالعه، تغییر جزئی در مقاومت کششی ملاحظه می‌شود، که قابل نتیجه‌گیری است که با رشد مقدار سیمان، مقاومت کششی بیشتر شده و افزایش سن و عمل‌آوری و نگهداری مطلوب، مقاومت حاصل از تنش‌های کششی ارتقا می‌یابد. با مقدار ضریب همبستگی بسیار بالایی که در شکل (۴-۱۰) نمایش داده شده افزایش یا کاهش مصرف سیمان ارتباط کاملاً پیوسته‌ای با میزان مقاومت کششی داشته است. سرعت واکنش زایی هر یک از اجزای مختلف سیمان پرتلند با آب، به طور قابل توجهی با یکدیگر تفاوت دارند، لذا ممکن است که روند افزایش مقاومت سیمان را به سادگی از طریق ترکیب اجزای سیمان تغییر داد. برای مثال، اگر سیمان دارای مقادیر نسبتاً زیادی از C_2S و C_3S باشد، مقاومت‌های اولیه ۳ و ۷ و ۲۸ روزه زیاد خواهند بود و اگر سیمان دارای نسبت زیادتری C_2S باشد، مقاومت اولیه کم خواهد بود.

• اثر فوق روان کننده

در بتن بازیافتی در محدوده مقادیر فوق روان کننده در این مطالعه با افزایش مقادیر میزان فوق روان کننده از مقدار مقاومت کششی کاسته شده است. در دید کلی با اضافه شدن مصالح بازیافتی موجب کاهش اسلامپ بتن حاوی ضایعات ساختمانی بازیافت شده که در جهت رفع این موضوع اضافه نمودن فوق روان کننده در محدوده پیشنهادی آیین نامه توصیه می‌گردد. با افزایش بیش از حد توصیه شده روان کننده‌ها به مخلوط بتن معمولاً آب انداختن بیشتر، جداسازی و کندگیری بیشتری را شاهد خواهیم بود. آب انداختن بیشتر

باعث واپاشیدگی بتن میشود. مقادیر بیشتر استفاده از این افزودنی ها معمولا موجب کندگیری بتن می گردد. تعیین مقدار مطلوب استفاده از این افزودنی ها باید بر اساس مقادیر پیشنهادی توسط تولید کننده و با ساخت طرح اختلاط های آزمایشی با به کارگیری مصالح مورد استفاده در پروژه مورد نظر صورت پذیرد. استفاده از برخی از این افزودنی ها موجب ایجاد حباب هوا در بتن شده و این مسئله باید همواره در استفاده از این افزودنی های شیمیایی مورد توجه قرار بگیرد ترکیبات سازنده این افزودنی های بتن عمدتا ترکیبات آلی بوده که می توانند باعث ایجاد تاخیر در زمان گیرش بتن شوند. برای جبران چنین مشکلی در برخی از این افزودنی ها از مقادیر کمی ترکیبات تسریع کننده استفاده می شود.

• اثر سنگدانه بازیافتی

با رشد استفاده از مواد سنگی بازیافت شده به عنوان ریزدانه و درشت دانه در بتن تولیدی جدید، از مقاومت فشاری و کششی کاسته شده است. سنگدانه های بازیافتی معمولا دارای مقاومت کششی کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی هستند. دلیل این امر، مقاومت کم ملات چسبیده به سنگدانه بازیافتی می باشد. مواد سنگی در زمان مخلوط شدن تا حدی به دانه های ریزتر از خود تبدیل می شوند، که این اتفاق موجب ریزدانه بیش تر در بتن و کاهش در اسلامپ بتن حاوی سنگدانه های ضایعاتی ساختمانی می گردد. همچنین علت دیگر این بوده که با رشد جایگزین کردن سنگدانه بازیافتی حفرات خمیر سیمان نیز افزایش یافته است، و با توسعه درصد جایگزین کردن این مواد تراکم کاسته شده است. بالاتر رفتن میزان مقادیر حفره های ساختاری بتن منجر به افت مقاومت بتن تولیدی از جایگزینی مواد بازیافتی هستیم.

• اثر ریزدانه

در همه موارد با استفاده از مصالح بازیافتی به جای طبیعی در قیاس با نمونه ساخته شده شاهد مقاومت کششی کمتری مشاهده شده است و با بالا بردن درصد جایگزینی مصالح بازیافتی به جای طبیعی این روند مقاومت پایین، بیشتر شده است؛ و همچنین با افزایش سن نمونه، مقاومت کششی نیز بیشتر شده است. بنابراین ماسه در بتن بازیافتی عامل مهم در کاهش مقاومت بوده است. دلایلی برای افت مقاومت بتن بازیافتی درمقایسه با بتن معمولی می توان در نظر گرفت. (۱) قسمت های ریز و ضعیف سطح سنگدانه ها خرد شده که منجر به افزایش میزان ماسه در طرح اختلاط می گردد. (۲) به علت خردشدگی بتن، به علت بودن ملات سیمانی سفت شده در نواحی سطحی، ترد تر از سنگ شکسته است، بافت های کریستالی در دو ملات سخت شده، مقاومت بالاتری نسبت به مقاومت یک قطعه ملات سخت شده و سنگ شکسته پایین تر از مقاومت بافت کریستالی مابین قطعه سنگ شکسته است که خود منجر به کاهش در میزان مقاومت بتن تولیدی می گردد.

• اثر سن نمونه

افزایش مقاومت ها با رشد سن نمونه نیز اتفاق مورد انتظار بود که در این مطالعه هم مشاهده گردید. قابل ذکر است که در کلیه نمونه های مورد مطالعه شکست در سنگدانه و ناحیه انتقال بتن رخ داده است، که نشان از ملات (خمیر سیمان مناسب) و سنگدانه و ناحیه انتقال ضعیف است. شکست اغلب نمونه ها از سنگدانه رخ داده است، این مطلب بدین معنی است که در این بتن به علت بالا بودن مقاومت ناحیه انتقال، سنگدانه به حداکثر مقاومت خود در سن بررسی شده رسیده است و بهترین استفاده از مقاومت سنگدانه ها به عمل آمده است که این منجر به تولید بتنی با خواص مکانیکی بالا و بهینه شده است. با توجه به تفاسیر فوق، می توان گفت علاوه بر مقاومت، افزایش مقاومت ناحیه انتقال، تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی بتن در سن مربوطه ایفا می کند.

۴- نتیجه گیری

با توجه به مطالعات مورد بررسی در این پژوهش، نتایج زیر حاصل گردیده است.

- در این تحقیق برای پیش‌بینی مقاومت کششی بتن بازیافتی و ارزیابی پارامتریک مدل هوشمند ارائه شده از روش‌های نوین مدلسازی داده اسپلاین رگرسیونی تطبیقی چندمتغیره یا مارس (MARS) استفاده گردید
- به جهت ارزیابی پارامترهای آزمایشگاهی اثرگذار بر رفتار بتن بازیافتی و مقاومت کششی در آن دو مدل با دو رویکرد متغیرهای ورودی پیش بین وزنی حجمی و نسبتی توسعه داده شد.
- با توجه به شاخص‌های آماری خطا در مرحله آموزش، مدل با ورودی‌های وزنی حجمی ($R=0.973$, $RMSE=0.044$) در مقایسه با مدل با ورودی نسبتی بی بعد شده ($R=0.903$, $RMSE=0.156$) دارای عملکرد مناسب‌تری برای تخمین مقاومت کششی بتن بازیافتی داشته است.
- همچنین شاخص آماری MAE برای مدل وزنی حجمی (0/15 مگاپاسکال) میانگین خطای کمتری را گزارش نموده است. بدین ترتیب، شاخص‌های آماری نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی با متغیرهای ورودی پیش بین وزنی حجمی از عملکرد خوب و دقت بالایی در مرحله آموزش نسبت به مدل نسبت مقادیر برخوردار بوده است.
- در مرحله آزمایش نیز پیش‌بینی مقادیر مقاومت کششی مدل‌ها، با دقت خوبی همراه بوده است. مدل وزنی حجمی ($R=0.954$, $RMSE=0.084$, $MAE=0.232$) در مقایسه با دیگر مدل این مطالعه دقت قابل توجهی را بیان نموده است.
- در نهایت با استفاده از رابطه محاسباتی منتج شده از مدل وزنی حجمی (رابطه با دقت بهتر و عملکرد مطلوب در این مطالعه) ارزیابی پارامتریک اجزای طرح اختلاط انجام و روند اثرگذاری این مواد و عوامل اثرگذار مشخص گردید.

مراجع

1. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.
2. Padmini, A. K., Ramamurthy, K., & Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829-836.
3. Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T., & Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and concrete research*, 31(5), 707-712.
4. Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76.
5. Abd, Abbas M., and Suhad M. Abd. "Modelling the strength of lightweight foamed concrete using support vector machine (SVM)." *Case Studies in Construction Materials* 6 (2017): 8-15.
6. Duan, Z. H., Kou, S. C., & Poon, C. S. (2013). Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 40, 1200-1206.
7. Ashrafian, A., Amiri, M. J. T., Rezaie-Balf, M., Ozbakkaloglu, T., & Lotfi-Omran, O. (2018). Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of fiber reinforced concrete incorporating nano silica using heuristic regression methods. *Construction and Building Materials*, 190, 479-494.
8. Asteris, P. G., Ashrafian, A., & Rezaie-Balf, M. (2019). Prediction of the compressive strength of self-compacting concrete using surrogate models. *Computers and Concrete*, 24(2), 137-150.
9. Golafshani, E. M., Behnood, A., & Arashpour, M. (2020). Predicting the compressive strength of normal and High-Performance Concretes using ANN and ANFIS hybridized with Grey Wolf Optimizer. *Construction and Building Materials*, 232, 117266.
10. Dao, D. V., Ly, H. B., Trinh, S. H., Le, T. T., & Pham, B. T. (2019). Artificial intelligence approaches for prediction of compressive strength of geopolymers concrete. *Materials*, 12(6), 983.
11. Friedman JH. Multivariate adaptive regression splines. *Ann Stat*(1991);19:1-141.
12. Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M. A., Serna, P., & Castaño-Tabares, J. O. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2545-2553.
13. Gonzalez-Fontboa, B., Martinez-Abella, F., Eiras-Lopez, J., & Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and structures*, 44(10), 1759.
14. JACOB, L. L. G. (2011). *Effects of Recycled Aggregates on Concrete Properties* (Doctoral dissertation).

15. Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506.
16. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.
17. Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 205-220.
18. Yang, K. H., Chung, H. S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.
19. Kou, S. C., & Poon, C. S. (2008). Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, 60(1), 57-64
20. Zheng, C., Lou, C., Du, G., Li, X., Liu, Z., & Li, L. (2018). Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, 9, 1317-1322
21. Vieira, J. P. B., Correia, J. R., & De Brito, J. (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 41(5), 533-541.
22. Alengaram, U. J., Salam, A., Jumaat, M. Z., Jaafar, F. F., & Saad, H. B. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Materials Research*, 14(2), 248-255
23. Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*, 58, 19-29
24. Folino, P., & Xargay, H. (2014). Recycled aggregate concrete-mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. *Construction and Building Materials*, 56, 21-31.
25. Kotrayothar, D. (2012). *Recycled aggregate concrete for structural applications* (Doctoral dissertation, University of Western Sydney).
26. Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19, 349-365
27. Zega, C. J., & Di Maio, A. A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Construction and building materials*, 23(5), 2047-2052.