

## Experimental Investigation and Estimation of Bond Strength of Rebar and High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites under High Temperature

Salim Karimpour<sup>1</sup>, Malek Mohammad Ranjbar<sup>2\*</sup>, Rahmat Madandoust<sup>3</sup>, Habib Akbarzadeh Bengar<sup>4</sup>

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

### ABSTRACT

In this study, the bond strength between rebar and high-performance fiber-reinforced cementitious composites (HPFRCC) containing the combination of three types of steel fibers (1% and 2%), polypropylene and polyvinyl alcohol (0.1, 0.2, 0.3 and 0.4%) has been investigated at the temperature of the laboratory, 400 and 600 °C. For this purpose, at first, 19 specimens were constructed and evaluated for compressive strength testing under the mentioned temperatures, as the silica fume was considered 20% by weight of cement. Among the constructed HPFRCC, four superior mix designs were selected for investigating the bond strength between rebar and HPFRCC using pullout test. The results showed that the bond strength between rebar and HPFRCC samples containing 2% steel fibers with PP fiber in such a way that increasing the temperature up to 400 °C, decreased about 38%. while this reduction rate for the samples containing PVA fibers is about 26%, and this means that PVA fibers have a better performance than PP fibers in term of the bond between concrete and rebar when exposed to high temperatures. By increasing the temperature up to 600°C, the bond strength of rebar and HPFRCC continues to decrease until this drop is about 64% for selected samples containing fibers (2% steel and 3% PP) at the laboratory temperature (i.e., 23°C). The reduction for the HPFRCC sample containing 2% steel and 2% PVA fibers is calculated by 62%. The results of this study and the literatures indicated the effect of different parameters on the bond strength, so for further investigation, the bond strength modelled using artificial intelligence models. The results of rebar bond strength modeling in HPFRCC showed that the performance of the adaptive multivariate regression splines based on error statistical criteria was more accurate than the artificial neural network. Therefore, it can be used as a reliable tool in data mining and artificial intelligence research in HPFRCC.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 20 December 2022

Revise Date: 25 March 2023

Accept Date: 08 April 2023

### Keywords:

Bond strength  
HPFRCC  
Polyvinyl alcohol fiber  
Modeling  
Artificial intelligence

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.376371.2994>

\*Corresponding author: Malek Mohammad Ranjbar.

Email address: ranjbar@guilan.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی و تخمین مقاومت پیوستگی میلگرد و کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند تحت اثر حرارت

سلیم کریم پور<sup>۱</sup>، ملک محمد رنجبر تکلیمی<sup>۲\*</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۳</sup>، حبیب اکبرزاده بنگر<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

### چکیده

در این مطالعه مقاومت پیوستگی میلگرد با کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند حاوی سه نوع الیاف فولادی (۱٪ و ۲٪)، پلی پروپیلین (PP) و پلی وینیل الکل (PVA) (۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪) که به صورت ترکیبی در نظر گرفته شده است، در دمای محیط آزمایشگاه و تحت اثر حرارت های ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا ۱۹ نمونه آزمایشگاهی برای استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تحت دماهای مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت که این کامپوزیت ها حاوی مواد چسباننده ی سیمان و دوده سیلیس (به میزان ۲۰ درصد وزنی سیمان) می باشند و از میان آنها ۴ طرح اختلاط آزمایشگاهی برتر برای آزمایش و ارزیابی مقاومت پیوستگی میان میلگرد و کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند در نظر گرفته شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت پیوستگی میلگرد با کامپوزیت های سیمانی توانمند حاوی الیاف ترکیبی (با ثابت نگه داشتن الیاف فولادی به میزان ۲ درصد) به نحوی بوده که افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد، میزان افت پیوستگی با الیاف PP حدود ۳۸ درصد بوده است در حالیکه این میزان کاهش برای نمونه های حاوی الیاف PVA حدود ۲۶٪ بدست آمده است. با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد، مقاومت پیوستگی کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند با میلگرد همچنان کاهش می یابد تا جایی که این افت برای نمونه های منتخب حاوی الیاف ترکیبی (۲٪ الیاف فولادی و ۳٪ الیاف PP) حدود ۶۴٪ مقاومت پیوستگی نمونه ها در دمای آزمایشگاه (یعنی ۲۳ درجه سانتی گراد) می باشد. این میزان افت برای نمونه حاوی ۲٪ الیاف فولادی و ۲٪ الیاف PVA برابر ۶۲٪ محاسبه شده است. نتایج مدل سازی مقاومت پیوستگی میلگرد در کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند نشان داد که عملکرد مدل اسپلین رگرسیون چندمتغیره انطباقی بر اساس معیارهای آماری خطا از دقت بیشتری نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی برخوردار بوده است.

کلمات کلیدی: مقاومت پیوستگی، کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند، الیاف پلی وینیل الکل، مدل سازی، روش های هوشمند مصنوعی.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.376371.2994">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.376371.2994</a>
۱۴۰۱/۰۹/۲۹	۱۴۰۲/۰۱/۰۵	۱۴۰۲/۰۱/۱۹	۱۴۰۲/۰۱/۱۹	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	doi: <a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.376371.2994">10.22065/jsce.2023.376371.2994</a>
*نویسنده مسئول:		ملک محمد رنجبر			
پست الکترونیکی:		ranjbar@guilan.ac.ir			

## ۱- مقدمه

بتن توانمند، بتنی با مقاومت و دوام بالا می‌باشد که از معایب آن، حالت‌های شکنندگی و مقاومت کششی پایین و قابلیت انعطاف-پذیری محدود را می‌توان نام برد [۱]. شرایط نگهداری نامناسب و بارگذاری بیش از ظرفیت باعث ایجاد ریزترک در بتن شده و به هم پیوستن این ریزترک‌ها در نهایت باعث خرابی و انهدام بتن می‌گردد. یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود رفتار پس از مقاومت حداکثر و ایجاد شکل‌پذیری مناسب در بتن، افزودن الیاف به آن است [۲]. هدف اصلی استفاده از الیاف در بتن کنترل گسترش ترک است، به گونه‌ای که مقطع پس از تشکیل اولین ترک‌ها توانایی تحمل تغییر شکل و نیروی بیشتری را داشته باشد. الیافی که بصورت تصادفی درون مخلوط بتن توزیع می‌شود در عرض ترک‌ها پل زده، گسترش آنها را کنترل کرده و از بهم پیوستن آنها جلوگیری می‌نماید. در این حالت الگوی تشکیل و رشد ترک عامل گسیختگی، از یک ترک بزرگ به تعدادی ترک ریز تغییر می‌کند. پل زدن الیاف روی ریز ترک‌ها و جلوگیری از تشکیل ترک‌های بزرگ، باعث افزایش شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بتن می‌شود [۳،۴].

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC<sup>۱</sup>) به جهت رفتار سخت‌شوندگی کرنشی تحت بار کششی می‌توان به عنوان مواد نوین کامپوزیتی تعریف کرد که می‌تواند به طور بالقوه مشکلاتی نظیر شکل‌پذیری پایین و تراکم میلگردها در مقاطع پر فولاد را از طریق توانایی ذاتی در پیوستگی و محصورشدگی، رفع کند. الیاف به صورت فلزی، پلیمری یا طبیعی طبقه‌بندی می‌شوند. در بین انواع مختلف الیاف، الیاف فولادی متداول‌ترین مورد برای اکثر اهداف ساختاری و غیر ساختاری است. مشخصات مهندسی و مزایای اقتصادی کامپوزیت‌های الیافی از بتن معمولی متمایز است، از این رو کامپوزیت‌های الیافی در طیف گسترده‌ای از کاربردها در صنعت ساخت و ساز محبوب می‌باشد. کامپوزیت‌های الیافی در ساختمان‌های بلند مرتبه از بکارگیری ستون‌های بزرگ در طبقه‌های پایین جلوگیری می‌کند [۵]. کامپوزیت‌های الیافی که برای پل‌های طولی استفاده می‌شود، بار مرده کمربندهای پل را کاهش می‌دهد و بنابراین باعث می‌شود تا عرض‌های زیرگذر بیشتری داشته باشد. کامپوزیت‌های الیافی الیافی الهام‌بخش صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های تعمیر و نگهداری پل و در عین حال طولانی‌تر شدن عمر سرویس‌دهی پل‌هاست [۶]. از میان الیاف مصنوعی، الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA<sup>۲</sup>) یکی از بهترین مصالح در بهبود رفتار بتن، مخصوصاً در کشش می‌باشد. پلی‌وینیل الکل یک پلیمر سنتزی با خواص عالی به شمار می‌آید که در صنایع مختلف از قبیل نساجی، پزشکی و محصولات غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. این محصول در حالت خشک پایدار، بدون بو، غیرسمی و دوستدار محیط زیست بوده و در زمان کوتاهی در محیط زیست به طور کامل تجزیه شده و فاقد آلودگی می‌باشد. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا و دوام خوب از دیگر خصوصیات این ماده است که کمتر در دیگر الیاف از قبیل الیاف پلی‌پروپیلن (PP<sup>۳</sup>)، نایلون و پلی‌اتیلن مشاهده می‌شود. همچنین PVA در محیط سیمانی با PH بالا از دوام خوبی برخوردار است. سطح آب دوست این الیاف با مصالح سیمانی پیوند شیمیایی برقرار کرده که بدلیل سخت بودن ماهیت فیزیکی آن نسبت به سیمان، پیوند محکمی با خمیر سیمان برقرار می‌کند [۷-۹].

بر اساس آیین‌نامه ACI 408 [۱۰]، یکی از نیازها برای طراحی بهینه سازه‌های بتنی مسلح انتقال کارا و مطمئن بار از میلگرد به بتن محاط شده آن می‌باشد. به صورت کلی می‌توان گفت که عملکرد پیوستگی بتن-میلگرد می‌تواند بر اساس چند عامل دچار ضعف و خرابی گردد. (۱) به دلیل از بین رفتن چسبندگی شیمیایی سطح بتن، لغزش میلگرد رخ می‌دهد. (۲) در اثر له شدن بتن مجاور میلگرد، خروج میلگرد رخ می‌دهد. (۳) از آنجایی که دنده‌های برجستگی‌های روی میلگرد مایل هستند، نیروی وارده بر میلگرد تنش شعاعی نرمال به محور میله ایجاد می‌کند و در نتیجه مد شکست جداشدگی پوشش بتن رخ می‌دهد [۱۱]. حالت شکست نمونه به پارامترهایی مانند ضخامت بتن پوشش دهنده میلگرد، شکل دندانه‌های برجستگی‌های اطراف میلگرد و مقاومت کششی بتن و مقاومت فشاری بتن بستگی دارد که می‌توان گفت بیشترین مقاومت پیوستگی در مد بیرون کشیدگی<sup>۴</sup> میلگرد از بتن رخ می‌دهد. استفاده از الیاف همچنین می‌تواند از طریق کنترل ترک‌ها و افزایش مقاومت کششی بتن، احتمال شکست جداشدگی بتن را کاهش داده و مقاومت پیوستگی را افزایش دهد.

<sup>1</sup> High performance fibre reinforced cementitious composite

<sup>2</sup> Polyvinyl alcohol fibre

<sup>3</sup> polypropylene

<sup>4</sup> Pull-out

علاوه بر این، شایان ذکر است که [10] ACI 408 در پرداختن به عملکرد نمونه‌های آزمایش بیرون کشیدگی معمولاً شکست را به عنوان حالت‌های شکست ترکیبی بیرون کشیدگی و جداسازی در نظر می‌گیرد.

تحقیقات پیشین شامل مطالعات بسیاری است که رفتار پیوستگی میلگرد فولادی تعبیه شده در بتن را بررسی می‌کند و اثرات افزودنی‌های مختلف مانند انواع الیاف بر روی این پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر دماهای بالا بر مقاومت پیوستگی میلگرد- بتن موضوع مهمی است که در مطالعات پیشین به آن پرداخته شده است. آنچه در ادامه می‌آید مروری بر این مطالعات است.

پان<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر الیاف PVA معمولی و روغنی بر روی خواص مکانیکی بتن پرداختند. الیاف روغنی دارای یک مایع بر روی سطح خود می‌باشد که از جذب آب جلوگیری می‌کند. چسبندگی الیاف PVA روغنی به علت مانع شدن از جذب آب نسبت به الیاف معمولی چسبندگی کمتری دارد. نتایج مطالعات آنها نشان داد که الیاف PVA معمولی باعث افزایش مقاومت بتن در برابر ترک خوردن می‌شود و الیاف PVA روغنی باعث افزایش شکل پذیری می‌شود. نتیجه مطالعات آنها برای استفاده از یک حالت ترکیبی بهینه از این دو الیاف برای بهبود عملکرد سازه برای دو حالت مقاومتی و شکل پذیری بوده است. جسوگلو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۳] برای مطالعه پیوستگی میان میلگرد فولادی و بتن حاوی ضایعات پلاستیکی به میزان ۳۰ درصد جایگزینی سنگدانه از آزمایش بیرون کشیدگی استفاده کردند و نتایج مطالعات خود را در نمودارهای بار-لغزش نشان دادند. در مطالعات آنها مشاهده شد که با افزایش میزان ضایعات، مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. مقاومت ضعیف پیوستگی بتن-میلگرد به بدتر شدن عملکرد کششی و فشاری بتن در نمونه‌های مکعبی بیرون کشیده شده (به‌ویژه بتن اطراف میلگرد) که در هر دو مد شکست بیرون کشیدگی و شکافت<sup>۷</sup> نسبت داده شد. وارونا<sup>۸</sup> و همکاران [۱۴] مقاومت پیوستگی میان میلگرد و بتن تقویت شده با الیاف را در دماهای بالا مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه آنها نمونه‌ها را برای آزمایش بیرون کشیدگی در دماهای ۲۳، ۲۰۰، ۴۵۰، ۶۵۰ و ۸۲۵ درجه سانتی‌گراد در نمونه‌های بتن معمولی و بتن مقاومت بالا که با الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی تقویت شده بود تهیه نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که اضافه کردن الیاف ترکیبی که حاوی الیاف فولادی با نسبت سطح بالا باعث افزایش مقاومت پیوستگی در دماهای بالا می‌شود. با این حال، بتن با مقاومت بالا که در معرض ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است، بیشترین کاهش مقاومت را داشته است. باسران<sup>۹</sup> و کالکان [۱۵] تغییرات پارامترهایی همچون نوع الیاف (بازالت، شیشه، کربن)، سطح تقویت شده میلگرد، فاصله میلگردها، پوشش بالا و پایین تیرهای بتنی، قطر تقویت شده، حضور خاموت، مقاومت فشاری بتن را در مقاومت پیوستگی بتن-میلگرد بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشانگر این بود که تأثیرات مقاومت فشاری بتن و میزان پوشش بتن بر روی پیوستگی ناچیز می‌باشد. به عنوان نتیجه اصلی، افزایش مدول الاستیسیته FRP باعث افزایش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن می‌شود.

در این مقاله با توجه به پیشینه مطالعات، استفاده از الیاف در بتن باعث بهبود پیوستگی بتن و میلگرد فولادی می‌گردد. در این مطالعه نیز حضور الیاف PP و PVA به صورت ترکیبی با الیاف فولادی در مقاومت پیوستگی بتن-میلگرد با استفاده از آزمایش بیرون-کشیدگی یا pull-out به عنوان یکی از اهداف ابتدایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس بر اساس هدف تعیین شده (بر مبنای میزان کاهش مقاومت فشاری در دماهای بالا)، برترین نمونه‌ها در حضور هر یک از الیاف‌های PP و PVA با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴٪ برای بررسی رفتار پیوستگی بتن-میلگرد تحت اثر دماهای مختلف نظیر ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش می‌شوند. در بخش دوم این مقاله، داده‌های جمع‌آوری شده در این مطالعه به همراه داده‌های آزمایشگاهی دیگر مطالعات، برای توسعه مدل‌های هوشمند مصنوعی نظیر شبکه عصبی مصنوعی (ANN<sup>۱۰</sup>) و اسپلاین رگرسیون چندمتغیره انطباقی (MARS<sup>۱۱</sup>)، در نظر گرفته شده است. از دلایل مهم استفاده از روش MARS در این مطالعه استخراج رابطه‌ای تجربی برای محاسبه و تخمین پیوستگی میلگرد و نمونه‌های HPFRCC می‌باشد که از میان روش‌های هوشمند مصنوعی، تعداد کمی از مدل‌ها وجود دارند که قابلیت ارائه رابطه میان متغیرهای وابسته و مستقل را دارا می‌باشند. همچنین

<sup>5</sup> Pan

<sup>6</sup> Gesoglu

<sup>7</sup> Splitting

<sup>8</sup> Varona

<sup>9</sup> Basaran

<sup>10</sup> Artificial neural network

<sup>11</sup> Multivariate adaptive regression splines

جهت ارزیابی عملکرد مدل هوشمند MARS نیازمند روش‌های دیگر جهت مقایسه دقت و خطای پیش‌بینی داریم که در این مطالعه از روش هوشمند ANN استفاده شده است. نتایج هر یک از مدل‌های هوشمند جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی مقاومت پیوستگی میلگرد و نمونه‌های HPFRCC تحت اثر حرارت‌های بالا با استفاده از شاخص‌های آماری خطا مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

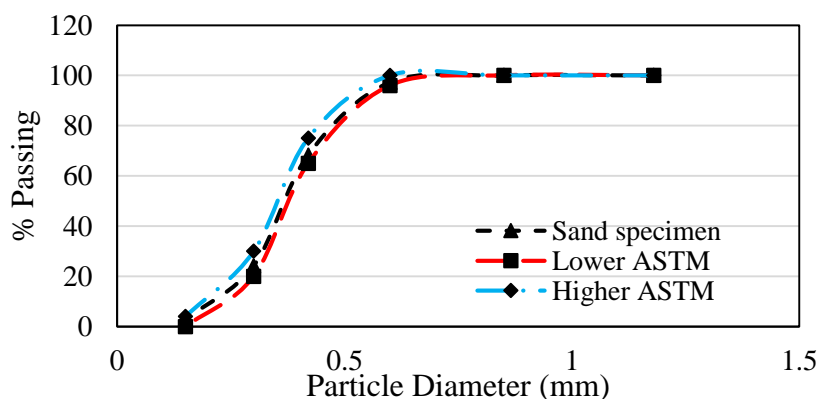
## ۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه به دو بخش اصلی که شامل مرحله آزمایشگاهی و مرحله مدل‌سازی با استفاده از روش‌های هوشمند مصنوعی می‌باشد. برای بررسی مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPFRCC و میلگرد، ابتدا با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری، بهترین نمونه‌ها در این مرحله مشخص و سپس نمونه‌های برتر برای آزمایش بیرون‌کشیدگی در اثر حرارت مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دوم این مطالعه، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست‌آمده به همراه داده‌های آزمایشگاهی دیگر مطالعات معتبر، دو تکنیک هوشمند مصنوعی نظیر ANN و MARS برای شبیه‌سازی رفتار پیوستگی میلگرد و نمونه‌های HPFRCC توسعه داده شد. سپس نتایج شبیه‌سازی حاصل از هر یک از مدل‌های هوشمند با استفاده از شاخص‌های آماری خطا نظیر ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا و .. ارزیابی می‌شود و بهترین عملکرد از لحاظ دقت و خطا در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی معرفی می‌گردد.

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

ماسه مورد استفاده در این مطالعه از معادن همدان تهیه گشته که حداکثر اندازه آن  $0/6$  میلیمتر بوده و این ماسه از نوع شکسته با چگالی  $2/51 \text{ gr/cm}^3$  و میزان جذب آب  $3/9$  درصد می‌باشد. پس از انجام آزمایش دانه بندی، این ماسه در محدوده مجاز تعیین شده توسط استاندارد ASTM C778 قرار گرفت که در شکل ۱ نشان داده شده است. سیمان تیپ II هگمتان در این پژوهش استفاده شده است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه گردیده است که این سیمان منطبق با استاندارد ASTM C150 می‌باشد. همچنین، مشخصات فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیسی سمنان (مصرف شده در این پروژه) در جدول ۱ آورده شده است. دوده های سیلیسی تولید شده با استاندارد ASTM C150، مطابقت دارند که در این پژوهش برای کنترل مشخصات ظاهری و اطمینان از عدم وجود کلوخه، از الک شماره ۳۰ عبور داده شد.

در این پژوهش از فوق روان کننده ی دیرگیر اصلاح شده با کد تجاری FARCO PLAST P10-3R از شرکت شیمی ساختمان استفاده گردید که پایه شیمیایی آن پلی کربوکسیلات اصلاح شده می‌باشد. الیاف فولادی به کار رفته در این پژوهش از جنس فولاد آلیاژی ضد زنگ با کد تجاری ۳۰۴ می‌باشد که توسط شرکت آزما صنعت سازان نارون تولید گردیده و مختص کاربردهای ویژه جهت کامپوزیت های سیمانی ریزدانه می‌باشد. الیاف PVA استفاده شده در این پژوهش تولید شرکت Kuraray ژاپن بوده است. همچنین الیاف PP استفاده شده در بتن نیز از شرکت صنایع شیمی ساختمان رامکا تهیه شده است که ویژه استفاده در انواع بتن الیافی می‌باشد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف به کار رفته شده در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱: دانه‌بندی ماسه استفاده شده در آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C150

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و دوده سیلیسی (برگرفته از نتایج بدست آمده از شرکت سازنده)

خصوصیات فیزیکی		ترکیبات شیمیایی	
<b>سیمان تیپ II هگمتان</b>			
170	گیرش اولیه (دقیقه)	19.9	SiO <sub>2</sub>
225	گیرش نهایی (دقیقه)	5.91	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	انبساط حجمی (میلیمتر)	2.10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
371	سطح ویژه (Blaine) (سانتیمتر مربع بر گرم)	62.92	CaO
25	مقاومت فشاری ۲ روزه (MPa)	1.25	MgO
40	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	0.38	Na <sub>2</sub> O
50	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	0.9	K <sub>2</sub> O
		3.26	SO <sub>3</sub>
		0.011	Cl-
		3.94	Loss On Ignition
		0.97	Eq. Alkali
<b>دوده سیلیسی سمنان</b>			
	شکل (بی شکل (آمورف)	85	SiO <sub>2</sub>
	شکل ذرات	1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.2-0.3	اندازه ذرات (میکرون)	2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
200-300	دانسیته فله ای (kg/m <sup>3</sup> )	1.5	CaO
14-20	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)	2	MgO
1.9-2.3	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	3	C
		3.5	Loss On Ignition
		1	رطوبت

جدول ۲: مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف های مصرفی در آزمایش (برگرفته از نتایج بدست آمده از شرکت سازنده)

نام الیاف	قطر الیاف (mm)	طول الیاف (mm)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )
Steel	0.2	13	620	7.85
PP	0.035	6	400	0.91
PVA	0.013	6	1600	1.3

## ۲-۲- طرح اختلاط و روش ساخت

در این پژوهش، نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت مکعبی  $7/5 \times 7/5 \times 7/5$  سانتی‌متری برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و استوانه‌ای  $20 \times 10$  بیرون کشیدگی ساخته شدند. برای مرحله اول این پژوهش، ۱۹ طرح اختلاط در نظر گرفته شد و در سه بخش این طرح‌ها ساخته شدند. سری اول شامل سنجش اثر درصد الیاف فولادی (۱ و ۲ درصد حجم بتن) به صورت منفرد بود و در سری دوم درصد‌های ثابتی از این الیاف به منظور بررسی اثر همزمان آنها با الیاف پلیمری در عملیات حرارتی در نظر گرفته شده و درصد‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و

۰/۴ حجم بتن از الیاف PVA به عنوان مکمل پلیمری برای الیاف فولادی لحاظ گردید. در سری سوم الیاف پلی پروپیلن به عنوان مکمل در درصدهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ حجم بتن لحاظ گردید. در تمامی طرح های ساخته شده، عیار مواد سیمانی و نسبت جایگزین دوده سیلیسی و همچنین نسبت آب به مواد سیمانی ثابت در نظر گرفته شدند. مقادیر و نسبت اجزای سازنده مخلوطهای مورد بررسی در این پژوهش، در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول، HS<sup>۱۲</sup> نوع کامپوزیت سیمانی، دو عدد بعدی عبارت HS میزان الیاف فولادی (۱۰=۱) و v و p، (۲=۲۰)٪، به ترتیب الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی وینیل الکل به همراه درصد حجمی استفاده آنها در طرح اختلاط را نشان می دهد. به عنوان مثال، نمونه HS10V02 نشان دهنده ۱٪ الیاف فولادی به همراه ۰/۲ درصد حجمی الیاف پلی وینیل الکل می باشد.

برای ساخت این مخلوط از میکسر ویژه پره ای استفاده گردید. برای اختلاط ابتدا مواد خشک با سرعت کم (۳۰ دور در دقیقه) با هم مخلوط می شوند تا اینکه دوده سیلیسی به طور کامل در مخلوط سیمان و ماسه محو گشته و کاهش حجم قابل ملاحظه ای در مخلوط خشک مشاهده گردد. سپس ۹۵٪ آب به همراه حداقل فوق روان کننده (۰/۰۳) به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه با سرعت پایین (۳۰ دور در دقیقه) مواد با هم مخلوط می گردند و میزان کارایی مخلوط با روش های متداول (از جمله میز جریان) کنترل می شود. الیاف در چند مرحله (حداکثر ۵ مرحله) به مخلوط اضافه شده و به مدت ۴ تا ۶ دقیقه با سرعت بالا اختلاط ادامه می یابد تا توزیع مطلوب (بر اساس ظاهر مخلوط) صورت گیرد. در پایان ۵٪ آب باقیمانده (در صورت نیاز به همراه بخش دوم فوق روان کننده) به مخلوط اضافه گشته و به مدت ۲ دقیقه با سرعت بالا (۷۰ دور در دقیقه) هم زدن ادامه می یابد. در این روش اختلاط، معیار توزیع مناسب الیاف، پهنه بندی مخلوط تازه به نواحی مساوی و ارزیابی چشمی در جهت بررسی عدم وجود توده های الیافی در مخلوط بوده است. پس از عملیات ساخت مخلوط بتن، نمونه ها قالب گیری شده و روی میز ویریه متراکم شدند. در ادامه نمونه های ساخته شده در حدود ۲۴ ساعت درون قالب باقی مانده و در این مدت بطور دائم سطح آنها مرطوب نگه داشته شدند (شکل ۲). پس از باز کردن قالب، نمونه ها تا سن مورد نظر جهت آزمایش ها در داخل حوضچه آب عمل آوری گردید.



شکل ۲: قالب آماده شده برای آزمایش بیرون کشیدگی

<sup>12</sup> High strength

جدول ۳: طرح اختلاط نمونه‌های HPFRCC (واحد تمام متغیرها بر حسب  $\text{kg/m}^3$  می‌باشد)

Mix Code	Cement	Silica Fume	Water	Super Plasticizer	Aggregate	Steel	PP	PVA
C	907	181	272	4.352	927	0	0	0
HS10	907	181	272	5.44	927	78.5	0	0
HS20	907	181	272	7.616	927	157	0	0
HS10V01	907	181	272	6.528	927	78.5	0	2.67.85
HS10V02	907	181	272	6.528	927	78.5	0	5.215.7
HS10V03	907	181	272	7.616	927	78.5	0	7.823.55
HS10V04	907	181	272	7.616	927	78.5	0	4.331.4
HS10P01	907	181	272	5.44	927	78.5	7.85	0
HS10P02	907	181	272	6.528	927	78.5	15.7	0
HS10P03	907	181	272	7.616	927	78.5	23.5 5	0
HS10P04	907	181	272	7.616	927	78.5	31.4	0
HS20V01	907	181	272	7.616	927	157	0	7.85
HS20V02	907	181	272	8.704	927	157	0	15.7
HS20V03	907	181	272	9.792	927	157	0	23.55
HS20V04	907	181	272	9.792	927	157	0	31.4
HS20P01	907	181	272	8.704	927	157	7.85	0
HS20P02	907	181	272	9.792	927	157	15.7	0
HS20P03	907	181	272	9.792	927	157	23.5 5	0
HS20P04	907	181	272	10.88	927	157	31.4	0

### ۳-۲-آزمایش مقاومت فشاری

برای آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881 [۱۶] از نمونه‌های مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر استفاده شد. نرخ بارگذاری فشاری در این آزمایش ۲ کیلونیوتن بر ثانیه یا  $0.25$  مگاپاسکال بر ثانیه می‌باشد. در این آزمایش، عمل‌آوری نمونه‌های HPFRCC در شرایط استاندارد و بخشی از نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی مورد آزمایش قرار گرفتند.

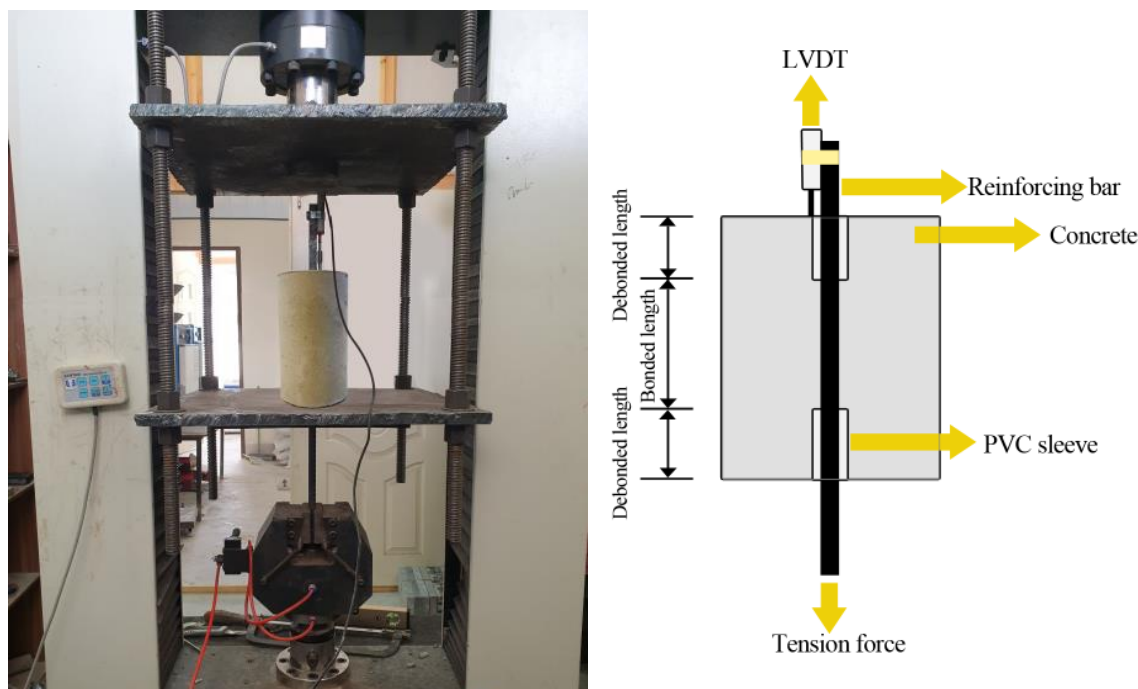
### ۴-۲-آزمایش بیرون کشیدگی (Pullout)

یک دستگاه آزمایش یونیورسال ( $UTM^{13}$ ) با ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی استفاده شده است. در این آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد  $20 \times 10$  سانتی‌متری به صورت عمودی بر روی صفحه فولادی پایینی از قاب فولادی تعبیه شده و

<sup>13</sup> Universal test machine



فک پایینی از دستگاه آزمایش انتهای بلندتر از میلگرد عبور داده شده از بتن را می‌گیرد. این در حالی است که بازوی بالایی دستگاه قاب فولادی و نمونه مکعب داخل را می‌کشد. برای اندازه‌گیری جابجایی نسبی میلگرد اطراف بتن (لغزش) از یک<sup>۱۴</sup> LVDT که در کوتاه‌ترین بخش از انتهای میلگرد قرار داده شده است، استفاده شد. همانگونه که در استاندارد RILEM RC6[۱۷] پیشنهاد شده است، برای یک میلگرد فولادی به قطر ۱۶ میلیمتر، نرخ بیرون کشیدگی با دستگاه برابر ۱۲۸ نیوتون بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین در این مطالعه طول گیرایی میلگرد برابر ۸۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش بیرون کشیدگی به همراه نمایش شماتیک نحوه اعمال بار در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایش شماتیک و واقعی از آزمایش بیرون کشیدگی

## ۵-۲- روش‌های هوشمند مصنوعی

در طراحی نمونه‌های طرح اختلاط در بتن تلاش می‌شود با نگاهی اقتصادی و صرف هزینه مناسب، بتنی بهینه تولید گردد. استفاده از روش‌های آیین‌نامه‌ای برای محاسبه طرح اختلاط، وقت گیر و پرهزینه است و لازم است حتماً محدودیت‌ها، شرایط و مفروضات آیین‌نامه‌های فناوری‌های بتنی را برای تمام اجزای تشکیل دهنده بتن در نظر گرفت. این مسأله سبب شد، روش‌های طراحی طرح اختلاط بر مبنای روابط محاسباتی ریاضیات و الگوریتم‌های بهینه‌سازی بررسی گردد. روشهای طراحی طرح اختلاط بهینه این نوع بتن می‌تواند با صرفه جویی‌های زمانی و اقتصادی موجب تمایل بیشتر کارفرمایان به استفاده از آن و طراحی‌های بهینه گردد. از این رو، استفاده از روش‌های داده مبنای هوشمند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مسائل در مهندسی و مدیریت پروژه‌های عمرانی به علت مزایای قابل تامل آن از جمله صرفه جویی در زمان و هزینه تولید بتن در مقاومت‌های مختلف، رفع مشکلات و محدودیت‌های تخصصی و امکاناتی برای کاربر جهت تولید بتن‌های خاص و جلوگیری از هدر رفت و دور ریز مواد و مصالح مصرفی با طراحی مدل‌های پیش طرح اختلاط بسیار فراگیر شده است.

<sup>14</sup> Linear variable differential transformer

## ۱-۵-۲- شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه

ساختار شبکه عصبی مصنوعی (MLP-NN<sup>۱۵</sup>)، به گونه‌ای است که نرون‌ها در دسته‌هایی به نام لایه مرتب می‌شوند. ساختار معمولی شبکه عصبی از سه لایه تشکیل شده است. لایه ورودی، داده‌ها را در شبکه توزیع می‌کند، لایه پنهان داده‌ها را پردازش می‌کند و لایه خروجی نتایج را به ازای ورودی‌های مشخص استخراج می‌کند [۱۸]. در این پژوهش، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌ها در لایه پنهان، بر مبنای مقایسه عملکرد شبکه‌ها انتخاب می‌شود که برای تشکیل شبکه از تابع آموزش Levenberg-Marquardt و تابع انتقال purelin و logsigmoid استفاده می‌گردد. بهترین معیار برای مقایسه عملکرد شبکه‌های ایجاد شده برای مرحله ارزیابی آموزش، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱۶</sup> می‌باشد، که مدل برازش شده خطی بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده انجام گردید [۱۹]. در این مقاله، الگوریتم MLP-NN با نرم‌افزار Matlab استفاده شده است.

## ۲-۵-۲- اسپلاین رگرسیون چندمتغیره انطباقی

اسپلاین رگرسیونی چندمتغیره انطباقی (MARS)، روش رگرسیونی غیر خطی و ناپارامتریک است که پاسخ‌های غیرخطی را بین ورودی‌ها و خروجی یک سیستم به وسیله مجموعه‌ای از قطعه‌های خطی تکه‌ای (کثیرالجمله‌های چند قطعه‌ای<sup>۱۷</sup>) با گرادین‌های متفاوت مدل‌سازی می‌کند [۲۰]. در این روش، فرضی ثابت برای برقراری رابطه میان 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 انحنایها، آستانه‌ها و دیگر انحراف‌های حاصل از توابع خطی را در نظر می‌گیرند [۲۱]. روش MARS، توابع پایه را با جست‌وجو به روش مرحله‌ای ایجاد می‌کند. الگوریتم رگرسیون انطباقی<sup>۱۸</sup>، برای انتخاب موقعیت‌های گره به کار می‌رود. مدل‌های MARS، به روش دو مرحله‌ای ایجاد می‌شوند. مرحله اول، توابع را جمع می‌بندند و گره‌های احتمالی را برای بهبود عملکرد می‌یابند، که به مدلی با برازش کامل می‌انجامد (مرحله مقدم). مرحله دوم، دربرگیرنده حذف کمترین جمله‌های حقیقی است (مرحله موخر). مدل MARS، به عنوان ترکیب خطی توابع پایه (BF<sup>۱۹</sup>) و روابط متقابل آنها ایجاد و به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]:

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

که  $\lambda_m(x)$  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. ضرایب  $\beta$  ثابت هستند و با استفاده از روش کوچک‌ترین مربعات برآورد می‌شوند. چون تابع پایه به فضای مدل اضافه می‌شود، اثرهای متقابل بین BF‌ها که پیش از این در مدل وجود داشتند نیز مورد توجه قرار می‌گیرند. سپس BF‌ها 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 [۲۳].

## ۶-۲- ارزیابی عملکرد مدل‌های هوشمند

<sup>15</sup> Multilayer perceptron neural network

<sup>16</sup> Root mean square error

<sup>17</sup> Splines

<sup>18</sup> Adaptive regression algorithm

<sup>19</sup> Basis function

برای اندازه گیری عملکرد مدل های ارائه شده در مرحله آموزش و آزمون، شاخص های آماری شامل ضریب همبستگی ( $R$ )، ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و میانگین خطای مطلق ( $MAE$ ) به شرح زیر مورد محاسبه قرار گرفت که در روابط زیر نمایش داده شده است. در این روابط  $T_{pre}$  داده های پیش بینی،  $T_{obs}$  داده های مشاهداتی و  $N$  تعداد داده ها می باشد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{obs} - \bar{T}_{obs}) \cdot (T_{pre} - \bar{T}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{obs} - \bar{T}_{obs})^2 \sum_{i=1}^N (T_{pre} - \bar{T}_{pre})^2}} \quad (2)$$

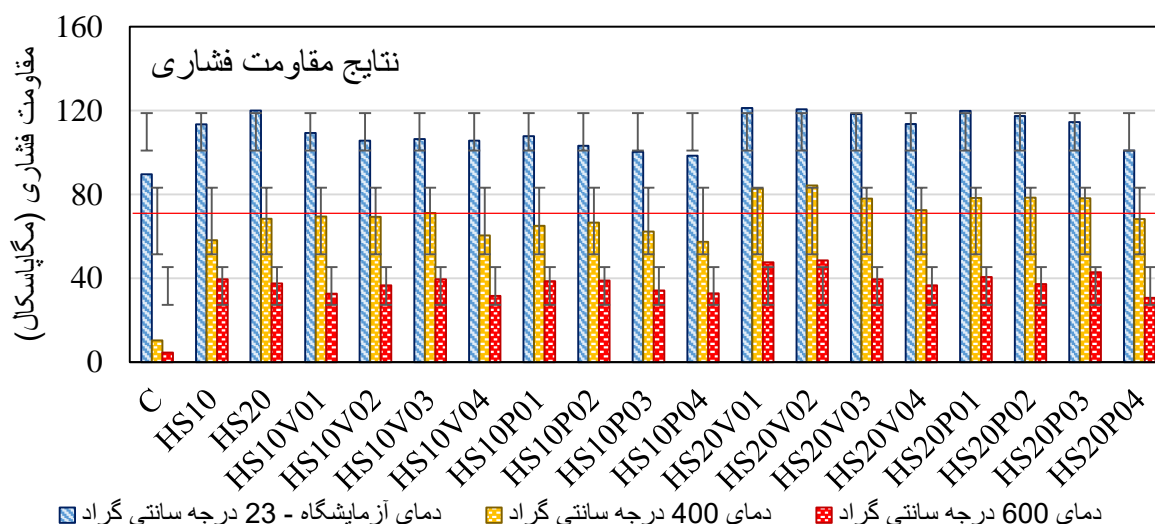
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{pre} - T_{obs})^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |T_{pre} - T_{obs}|}{N} \quad (4)$$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

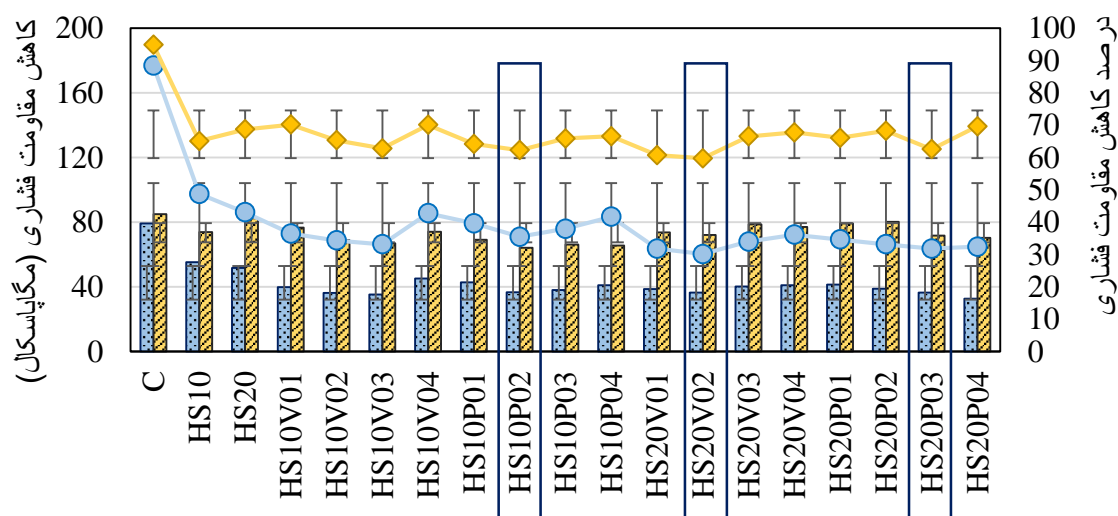
در این پژوهش، در تمام مخلوطها آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش برای نمونه های در محیط آزمایشگاه (یعنی ۲۳ درجه سانتی گراد)، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد در شکل ۴ نشان داده شده است. این مقادیر، میانگین مقاومت فشاری سه آزمون هستند. بر اساس این نتایج، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون HS20 که دارای ۲٪ الیاف فولاد می باشد حدود ۵ درصد نسبت به آزمون HS10 افزایش یافته است. از میان نمونه های حاوی الیاف PP، آزمون HS20P01 با داشتن مقاومت فشاری ۱۱۹/۸ MPa و نمونه های حاوی الیاف PVA، آزمون HS20V01 با داشتن مقاومت فشاری ۱۲۱/۳ MPa بهترین عملکرد را داشته اند. این نمونه به ترتیب با داشتن ۰/۱ و ۰/۲ درصد بیشترین مقاومت فشاری را داشته اند. نتایج نشان داده است که حجم الیاف PP و PVA مصرفی از مقدار مشخصی بیشتر شود، الیاف نه تنها تاثیری در افزایش مقاومت فشاری ندارد، بلکه سبب کاهش مقاومت نیز می شود [۸، ۱۴].



شکل ۴: مقادیر مقاومت فشاری نمونه در دمای آزمایشگاه و ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

بر اساس یکی از مهمترین اهداف این پژوهش که بررسی عملکرد مقاومتی نمونه‌ها در اثر حرارت بالا می‌باشد، این آزمون‌ها در معرض دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت تا در این مرحله بهترین طرح‌های اختلاط برای آزمایش بیرون کشیدگی در نظر گرفته شوند. لذا بعد از این که نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در معرض حرارت ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه قرار گرفتند، بعد از ۲۴ ساعت خنک شدن نمونه‌ها، هر یک از نمونه‌ها مورد آزمایش مقاومت فشاری گردند. بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۵، کاهش مقاومت فشاری در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای آزمون‌هایی که حاوی الیاف PP ۰/۲ درصد و PVA ۰/۳ درصد بوده‌اند در گروه الیاف فولادی ۱ درصد به کمترین میزان بوده است. به عنوان مثال در آزمون HS10V03 که دارای ۰/۳ درصد الیاف PVA بوده است، درصد کاهش مقاومت فشاری در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۳۵/۳ بوده است، درحالی‌که این میزان کاهش برای آزمون HS10 که دارای الیاف پلیمری نبوده است، برابر ۵۵/۳ MPa می‌باشد. نتایج نشان گر این است که افزودن الیاف پلیمری باعث ننگ داشتن خواص مقاومتی بتن از جمله مقاومت فشاری آن در دماهای بالا می‌شود و بتن با در بر داشتن الیافی همچون PP یا PVA از افت کمتری در عملکرد سازه‌ای خواهد داشت. اما دانستن درصد بهینه این الیاف در به کار گیری آن در بتن، امری ضروری می‌باشد. معیار انتخاب شاید برای نمونه HS20P03 و HS20P04 در دمای ۴۰۰ درجه کمی سخت و سخت‌گیرانه به نظر آید، اما درصد کاهش مقاومت فشاری برای نمونه حاوی ۰/۳ درصد الیاف PP در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از نمونه حاوی ۰/۴ درصد الیاف PP بوده است.

کاهش مقاومت فشاری در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد      کاهش مقاومت فشاری در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد  
 درصد کاهش مقاومت فشاری در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد      درصد کاهش مقاومت فشاری در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵: مقادیر و درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای آزمایشگاه

لذا با توجه به نتایج این بخش و با در نظر گرفتن هر یک از بهترین طرح‌های اختلاط در این مطالعه، ۴ طرح اختلاط برای آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از بتن در بخش بعدی با توجه به نتایج بدست آمده از در معرض قرار دادن نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب می‌شود. همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، این چهار طرح اختلاط شامل: HS10P02, HS10V03, HS20P03 و HS20V02 می‌باشد.

## ۲-۳- نتایج آزمایش بیرون کشیدگی تحت اثر حرارت

استاندارد RILEM RC6[17] برای محاسبه میانگین تنش پیوستگی در طول میلگرد قرار گرفته در بتن (طول گیرایی) با استفاده از نیروی کششی در آزمایش بیرون کشیدگی، رابطه زیر را پیشنهاد داده است:

$$\tau_b = \frac{F}{5\pi d_s^2} \quad (5)$$

بر اساس استاندارد ACI 408[10]، پارامترهایی که بر روی مقاومت پیوستگی تاثیر دارند به سه گروه تقسیم می‌شوند: پارامترهای سازه‌ای (پوشش بتن، طول گیرایی)، پارامترهای مربوط به بتن (مقاومت‌های فشاری و کششی، کارایی، نوع سنگدانه) و پارامترهای مربوط به میلگرد (تنش تسلیم، تنش نهایی، مدول الاستیسیته). در این پژوهش، ارزیابی میزان درصد حجمی الیاف PP و PVA به همراه اثرات دماهای بالا بر روی مقاومت پیوستگی میلگرد-بتن در آزمایش بیرون کشیدگی، یکی از اهداف اصلی می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۶، نمونه‌هایی که حاوی الیاف فولادی با ۲٪ بوده‌اند، حدود ۹٪ پیوستگی بالاتری را از خود نشان دادند. نتایج نشان داده است که عملاً در دمای آزمایشگاه، به کارگیری الیاف PVA یا PP تاثیر چندانی بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPCFRCC و میلگرد ندارد و این میزان تفاوت در افزایش پیوستگی در نمونه‌هایی که حاوی PVA هستند نمی‌تواند معیار تصمیم‌گیری در این پژوهش باشد.

در خصوص اعمال حرارت بر نمونه‌های بتنی حاوی الیاف، نتایج نشان می‌دهد که با قرار دادن نمونه‌ها در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت پیوستگی نمونه HS10V03 به ترتیب ۵/۸۳ و ۹/۸۵ مگاپاسکال شده که حدود ۳۹ و ۶۴ درصد پیوستگی میان میلگرد و بتن کاسته شده است. این میزان کاهش در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه HS10P02 به ترتیب ۵۳ و ۶۸٪ بدست آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده اینگونه برداشت می‌شود که با میزان برابر الیاف فولادی، نمونه‌ای که حاوی الیاف PP بوده است با شدت بیشتری در دماهای بالا کاهش یافته است. عملکرد پیوستگی میلگرد و نمونه‌های HPCFRCC در نمونه‌های حاوی الیاف فولاد ۲٪، به نحوی بوده است که با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان افت پیوستگی با الیاف PP حدود ۳۸٪ بوده است در حالیکه این میزان کاهش برای نمونه‌های حاوی الیاف PVA حدود ۲۶٪ بدست آمده است و این یعنی الیاف PVA در معرض دما عملکرد بهتری نسبت به الیاف PP در ترم پیوستگی بتن و میلگرد دارد.

با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPCFRCC همچنان کاهش می‌یابد تا جایی که این افت برای نمونه‌های منتخب (HS20V02) حدود ۶۲٪ مقاومت پیوستگی نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه (یعنی ۲۳ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. زمانی که ۲٪ الیاف فولادی در نمونه‌های حاوی PVA استفاده می‌شود، مد شکست آن مطابق مطالعات پیشین [۱۱] از شکافت به بیرون کشیدگی تبدیل می‌شود و این مقاومت پیوستگی تا بیشتر از ۱۰٪ افزایش می‌یابد. در این مطالعه نیز، با فرض ثابت در نظر گرفتن الیاف مصنوعی، با افزایش الیاف فولادی از ۱٪ به ۲٪ در دمای ۶۰۰ درجه، مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPCFRCC حدود ۱۷٪ افزایش یافته است. در واقع، زمانی که ترک‌های ریز در اثر تنش کششی در نمونه‌ها به وجود می‌آید، تعامل و مشارکت الیاف، بویژه الیاف فولادی شروع می‌شود و مانع از گسترش ریز ترک‌ها می‌گردد.



شکل ۶: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی نمونه‌ها در دماهای ۲۳، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

### ۳-۳- نتایج شبیه‌سازی مقاومت پیوستگی ( $\tau_p$ )

در این پژوهش با توجه به اهداف تعیین شده در خصوص مدل‌سازی با استفاده از روش‌های هوشمند مصنوعی می‌بایست جهت جامعیت نتایج بدست آمده و رابطه ارائه شده توسط مدل MARS، تعداد آزمون‌های آزمایش را با استفاده از مطالعات پیشین افزایش داد. پس، ۱۲۰ داده آزمایشگاهی از تحقیقات وارونا و همکاران [۱۴]، کای و همکاران [۲۴]، لایکا، فکور و نعمت‌زاده [۱۱]، چونگ و همکاران [۲۵] و کیم و همکاران [۲۶] جمع‌آوری شد و با فرض شرایط اختلاط یکنواخت برای پیش‌بینی مقاومت پیوستگی بیست و هشت روزه نمونه‌های HPCRCC تحت اثر دما به همراه ۱۲ آزمون از این مطالعه و مجموعاً ۱۳۲ داده به صورت ۷۵ درصد آموزش و ۲۵ درصد آزمون در نظر گرفته شد. عملکرد مطلوب مدل‌های هوشمند در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی بیست و هشت روزه HPCRCC، تا حد زیادی به جامعیت داده‌های آموزشی بستگی دارد. دسترسی به انواع زیادی از داده‌های تجربی مورد نیاز برای توسعه روابط بین متغیرهای مخلوط نمونه‌های HPCRCC، از اهمیت زیادی برخوردار است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای ورودی مدل آموزشی، شامل عوامل مشخص شده در رابطه (۵) نظیر نیروی بار (Pu)، طول گیرایی (ld)، قطر میلگرد (db) به همراه پارامترهای مدنظر در این پژوهش نظیر مقاومت فشاری بتن (fc)، تنش تسلیم میلگرد (fy)، مقدار الیاف (Ftot) و دما (T) می‌باشد. در انتخاب مناسب‌ترین حالت پارامترهای ورودی به جهت آموزش بهتر برای توسعه مدل، پس از تولید تصادفی داده‌ها و کنترل بیشینه و کمینه‌ها، از روش سعی و خطا استفاده شد.

در این مطالعه از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با یک لایه مخفی استفاده شد. برای آموزش و آزمایش شبکه‌ها به ترتیب از ۷۵ درصد (۹۸ عدد) و ۲۵ درصد (۳۰ عدد) داده‌ها استفاده شده است. ملاک تعیین مدل نهایی، عملکرد آن در مرحله آزمون می‌باشد. لازم به ذکر است که با هر بار آنالیز مدل MLP-NN در نرم‌افزار متلب، وزن‌های متفاوتی به شبکه اختصاص داده می‌شود؛ در نتیجه با هر بار آنالیز جواب متفاوتی حاصل می‌گردد. برای مرتفع کردن این مسئله برای هر مدل شبکه عصبی مصنوعی ۱۲ بار آنالیز انجام شده که در نهایت بهترین جواب به عنوان مدل نهایی انتخاب شده است. ارزیابی تعداد نرون بررسی شده در لایه مخفی نشان داد، توسعه مدل با ۵ نرون بهترین عملکرد را در تخمین مقاومت فشاری داشته است. در این مطالعه نرخ آموزش ۰/۳ و شاخص مومنوم ۰/۱۵ و تعداد دور آموزش مدل ۲۰۰۰ بوده است.

جزئیات تحلیلی پارامترهای تنظیم کننده کاربر در روش MARS شامل نوع تابع پایه مورد استفاده، تعداد آنها و بیشترین مقدار عکس‌العمل هر تابع بعد از آزمون و خطا بررسی شد. برآزش در هر تابع پایه بصورت جداگانه صورت پذیرفته و روابط مربوط به این برآزش

ارائه شده است. در این مطالعه از ۱۷ تابع چندتکه‌ای خطی برای توسعه مدل پیشنهادی استفاده شد. همچنین بیشترین مقدار عکس‌العمل برای آزادی متغیرهای ورودی ۲ و شاخص ارزیابی متقابل تعمیم یافته ۳/۶۰۷ بوده است. جدول ۴ توابع پایه و معادلات متناظر هرکدام را مشخص کرد. این توابع و روابط ارائه شده مربوط، به منظور انتخاب بهترین مدل و رابطه نهایی بهینه از خروجی مورد نظر با توجه به رابطه MARS ارائه شده است. در این جدول  $X_1$  تا  $X_7$  که به ترتیب بیان‌گر نیروی بار (Pu)، طول گیرایی (ld)، قطر میلگرد (db)، مقاومت فشاری بتن (fc)، تنش تسلیم میلگرد (fy)، مقدار الیاف (Ftot) و دما (T) پارامترهای ورودی مدل بوده که میزان هر BF را مشخص می‌کند. رابطه MARS ارائه شده برای مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPRCC مطابق رابطه زیر است:

$$y = 28.51 + 0.04546 * BF1 + 12.31 * BF2 + 0.06604 * BF3 + 0.2986 * BF4 - 0.1628 * BF5 + 0.01127 * BF6 - 0.3605 * BF7 + 0.5636 * BF8 - 0.0256 * BF9 + 0.00752 * BF10 - 0.003663 * BF11 + 0.009232 * BF12 - 0.01094 * BF13 - 0.01234 * BF14 - 0.002361 * BF15 + 3.788e - 05 * BF16 - 0.04333 * BF17 \quad (6)$$

جدول ۴: توابع پایه و روابط مربوطه در روش MARS برای پیش‌بینی مقاومت پیوستگی

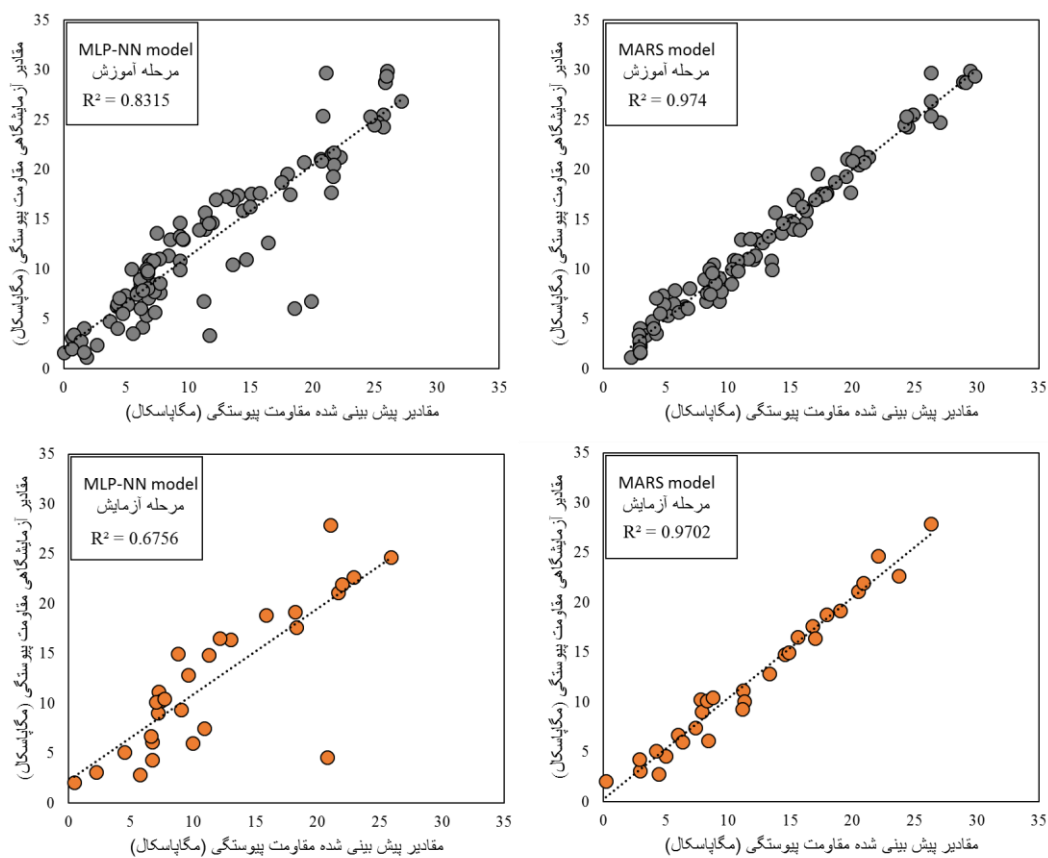
تابع پایه	رابطه
BF1	$\max(0, x_6 - 0.3)$
BF2	$\max(0, 0.3 - x_6)$
BF3	$BF1 * \max(0, 14 - x_3)$
BF4	$\max(0, x_1 - 69.74)$
BF5	$\max(0, 69.74 - x_1)$
BF6	$\max(0, x_4 - 41.1) * \max(0, x_1 - 59.95)$
BF7	$\max(0, 54.9 - x_4)$
BF8	$\max(0, 19.1 - x_4)$
BF9	$\max(0, x_4 - 19.1) * \max(0, x_3 - 13)$
BF10	$BF7 * \max(0, 23.93 - x_1)$
BF11	$\max(0, x_4 - 41.1) * \max(0, x_1 - 18.58)$
BF12	$\max(0, 41.1 - x_4) * \max(0, 54.91 - x_1) * \max(0, x_5 - 500)$
BF13	$BF5 * \max(0, 26.85 - x_4)$
BF14	$\max(0, x_4 - 19.1) * \max(0, x_2 - 50)$
BF15	$\max(0, x_4 - 19.1) * \max(0, x_7 - 300)$
BF16	$BF14 * \max(0, x_7 - 200)$
BF17	$BF13 * \max(0, 50 - x_2)$

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، ضریب همبستگی (R) در مرحله آموزش برای روش MARS و MLP-NN، به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۱ می‌باشد. همچنین، مقدار شاخص آماری RMSE به ترتیب ۱/۲۲ و ۳/۳۶۸ بدست آمده است. بدین ترتیب، شاخص‌های آماری، نشان می‌دهد هر دو مدل، با آموزش مطلوبی مواجه بوده‌اند. از طرف دیگر، شاخص آماری (R)، در مرحله آزمون برای مدل MARS و MLP-NN به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۸۲ و MAE برای مدل‌های مذکور ۱/۰۳۵ و ۲/۸۲۵ تعیین گردید. عملکرد مدل MARS ارائه شده در مرحله آموزش و آزمون، از دقت بیشتری در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPRCC برخوردار بوده است. از این رو می‌توان به عنوان ابزاری معتبر در داده کاوی و پژوهش‌های هوش مصنوعی در بتن مورد استفاده قرار گیرد. با اینکه هر دو مدل هوشمند توانسته‌اند با دقت قابل قبولی رابطه‌ای میان متغیرهای وابسته و مستقل این پژوهش پیدا کنند، اما به نظر می‌رسد علت عملکرد بهتر مدل MARS در مقابل روش ANN، آموزش بهتر مدل با تعداد پارامتر کمتر درون شبکه و حساسیت کمتر شبکه در مدل MARS

نسبت به روش ANN می‌باشد و به همین دلیل، روش MARS توانسته است این مسئله پیچیده با پارامترهای مستقل بسیار را بهتر پیش-بینی کند.

جدول ۵: ارزیابی عملکرد مدل MARS در مقایسه با MLP-NN برای پیش‌بینی مقاومت پیوستگی

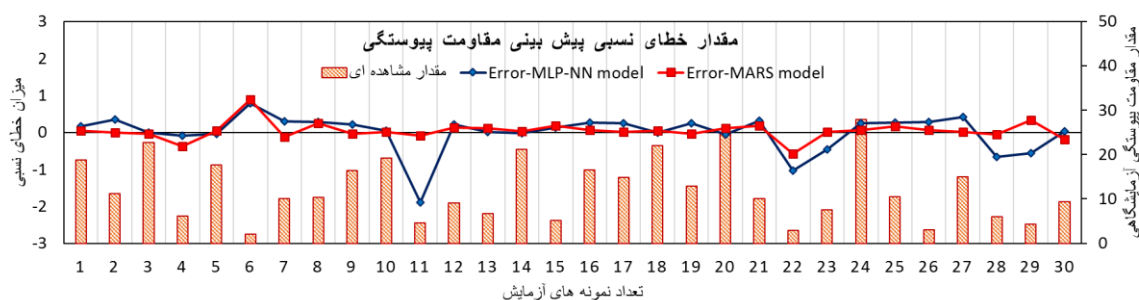
	مدل	R	RMSE	MAE
آموزش	MLP-NN	0.91	3.368	2.533
	MARS	0.98	1.22	0.925
آزمون	MLP-NN	0.82	4.135	2.825
	MARS	0.98	1.265	1.035



شکل ۷: نمودار پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت پیوستگی توسط مدل‌های MARS و MLP-NN

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمودار پراکندگی مقادیر مقاومت پیوستگی مشاهداتی و پیش‌بینی نظیر آن توسط مدل پیشنهادی MARS و MLP-NN در مرحله آموزش و آزمون و همچنین میزان خطای نسبی پیش‌بینی توسط این دو مدل هوشمند را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، داده‌ها در اطراف خط ایده‌آل متمرکز شده که نشان از همبستگی مقادیر واقعی و محاسباتی مدل می‌باشد. همچنین مقادیر پیش‌بینی MLP-NN در مقایسه با MARS دچار انحراف بیشتری از مقادیر واقعی شده است. شکل ۹، مقادیر خطای نسبی برای مقادیر محاسباتی MARS و MLP-NN در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی را نشان داده است. مدل MARS در تخمین بیشینه‌ها و کمینه‌های محلی موفقیت بیشتری در مقایسه با MLP-NN، در مرحله آزمون داشته است.





شکل ۸: مقادیر خطای نسبی مدل‌های MARS و MLP-NN در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPFRCC

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ۱۹ نمونه آزمایشگاهی در سه گروه اصلی ساخته شدند. سری اول شامل سنجش اثر درصد الیاف فولادی (۱ و ۲ درصد) به صورت منفرد بود و در سری دوم درصدهای ثابتی از این الیاف به منظور بررسی اثر همزمان آنها با الیاف پلیمری در عملیات حرارتی در نظر گرفته شده است و درصدهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ از الیاف PVA به عنوان مکمل پلیمری برای الیاف فولادی لحاظ گردید. در سری سوم الیاف پلی پروپیلن به عنوان مکمل در درصدهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ لحاظ گردید. سپس ۴ طرح برتر در عملکرد مقاومت فشاری برای آزمایش بیرون کشیدگی انتخاب شد.

۱. نتایج نشان داد که در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، در گروه الیاف فولادی ۰/۲٪، نمونه‌های حاوی الیاف PVA ۰/۲ درصد و PP ۰/۳ درصد دارای کمترین کاهش مقاومت فشاری بوده‌اند. همچنین، این میزان کاهش برای گروه الیاف فولادی با ۰/۱٪، برای نمونه‌های HPFRCC که حاوی الیاف PVA ۰/۳ درصد و PP ۰/۲ درصد بوده اند صورت پذیرفته است.
۲. در خصوص اعمال حرارت روی نمونه‌های HPFRCC، نتایج نشان می‌دهد که با قرار دادن نمونه‌ها در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت پیوستگی نمونه‌هایی که حاوی ۰/۲٪ الیاف فولادی و ۰/۳٪ PVA می‌باشد، به ترتیب حدود ۷/۴ و ۵/۱۳ مگاپاسکال شده که حدود ۳۹ و ۶۴ درصد پیوستگی میان میلگرد در نمونه‌های HPFRCC کاسته شده است.
۳. عملکرد پیوستگی میلگرد و HPFRCC در نمونه‌های حاوی الیاف فولاد ۰/۲٪، به نحوی بوده است که با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان افت پیوستگی با الیاف PP حدود ۳۸٪ بوده است در حالیکه این میزان کاهش برای نمونه‌های حاوی الیاف PVA حدود ۲۶٪ بدست آمده است. این میزان افت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای الیاف PVA حدود ۶۱٪ و برای الیاف PP ۶۴٪ محاسبه شده است.
۴. بر اساس نتایج بدست آمده اینگونه برداشت می‌شود که با میزان برابر الیاف فولادی، نمونه‌ای که حاوی الیاف PP بوده است دارای کاهش ناگهانی بیشتری در دماهای بالا بوده است و این یعنی الیاف PVA در معرض دماهای بالاتر عملکرد بهتری نسبت به الیاف PP در ترم پیوستگی میلگرد و HPFRCC دارد.
۵. در بخش مدل‌سازی، ضریب همبستگی در مرحله آموزش برای روش MARS و MLP-NN، به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۱ و مقدار شاخص آماری RMSE به ترتیب ۱/۲۲ و ۳/۳۶۸ بدست آمده است. بدین ترتیب، شاخص‌های آماری، نشان می‌دهد هر دو مدل، با آموزش مطلوبی مواجه بوده‌اند. از طرف دیگر، شاخص آماری (R)، در مرحله آزمون برای مدل MARS و MLP-NN به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۸۲ و MAE برای مدل‌های مذکور ۱/۰۳۵ و ۲/۸۲۵ تعیین گردید. عملکرد مدل MARS ارائه شده

در مرحله آموزش و آزمون، از دقت بیشتری در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی نمونه‌های HPRCC برخوردار بوده است. از این رو می‌توان به عنوان ابزاری معتبر در داده کاوی و پژوهش‌های هوش مصنوعی در بتن مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Liu, F. and Li, Q.M. (2019) Strain-rate effect on the compressive strength of brittle materials and its implementation into material strength model. *International Journal of Impact Engineering*. 130 113–123.
- [2] Mobasher, B., Peled, A., and Pahlajani, J. (2007) Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites. *Materials and Structures*. 39 (3), 317–331.
- [3] Afroughsabet, V., Biolzi, L., and Ozbakkaloglu, T. (2016) High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*. 51 (14), 6517–6551.
- [4] Zollo, R.F. (1997) Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*. 19 (2), 107–122.
- [5] Naser, M.Z., Hawileh, R.A., and Abdalla, J.A. (2019) Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*. 198 109542.
- [6] Aidoo, J., Harries, K.A., and Petrou, M.F. (2004) Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Bridge Girders. *Journal of Composites for Construction*. 8 (6), 501–509.
- [7] Jang, J.G., Kim, H.K., Kim, T.S., Min, B.J., and Lee, H.K. (2014) Improved flexural fatigue resistance of PVA fiber-reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles. *Construction and Building Materials*. 59 129–135.
- [8] Liu, F., Ding, W., and Qiao, Y. (2020) Experimental investigation on the tensile behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete containing fly ash and slag powder. *Construction and Building Materials*. 241 118000.
- [9] Liu, F., Ding, W., and Qiao, Y. (2019) Experimental investigation on the flexural behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete containing fly ash and slag powder. *Construction and Building Materials*. 228 116706.
- [10] A.C.I. (2003) ACI 408R-03: Bond and development of straight reinforcing bars in tension. in: USA.
- [11] Fakoor, M. and Nematzadeh, M. (2021) Evaluation of post-fire pull-out behavior of steel rebars in high-strength concrete containing waste PET and steel fibers: Experimental and theoretical study. *Construction and Building Materials*. 299 123917.
- [12] Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., and Liu, J. (2015) Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*. 78 397–404.
- [13] Gesoglu, M., Güneysi, E., Hansu, O., Ipek, S., and Asaad, D.S. (2015) Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 101 1113–1121.
- [14] Varona, F.B., Baeza, F.J., Bru, D., and Ivorra, S. (2018) Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*. 176 359–370.
- [15] Basaran, B. and Kalkan, I. (2020) Investigation on variables affecting bond strength between FRP reinforcing bar and concrete by modified hinged beam tests. *Composite Structures*. 242 112185.
- [16] B.S. (1983) BS 1881: Method for determination of compressive strength of concrete cubes. in London .
- [17] Rilem, T.C. (1994) RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. 218–220.
- [18] Alizadeh, M.J. and Kavianpour, M.R. (2015) Development of wavelet-ANN models to predict water quality parameters in Hilo Bay, Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*. 98 (1–2), 171–178.
- [19] Sattar, A.A., Elhakeem, M., Rezaie-Balf, M., Gharabaghi, B., and Bonakdari, H. (2019) Artificial intelligence models for prediction of the aeration efficiency of the stepped weir. *Flow Measurement and Instrumentation*. 65 78–89.
- [20] Rezaie-balf, M., Naganna, S.R., Ghaemi, A., and Deka, P.C. (2017) Wavelet coupled MARS and M5 Model Tree

- approaches for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*. 553 356–373.
- [21] Rezaie-Balf, M. (2019) Multivariate adaptive regression splines model for prediction of local scour depth downstream of an apron under 2D horizontal jets. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 43 (1), 103–115.
- [22] Ghaemi, A., Rezaie-Balf, M., Adamowski, J., Kisi, O., and Quilty, J. (2019) On the applicability of maximum overlap discrete wavelet transform integrated with MARS and M5 model tree for monthly pan evaporation prediction. *Agricultural and Forest Meteorology*. 278 107647.
- [23] Zhang, W.G. and Goh, A.T.C. (2013) Multivariate adaptive regression splines for analysis of geotechnical engineering systems. *Computers and Geotechnics*. 48 82–95.
- [24] Cai, B., Wu, A., and Fu, F. (2020) Bond behavior of PP fiber-reinforced cinder concrete after fire exposure. *Computers and Concrete, An International Journal*. 26 (2), 115–125.
- [25] Chung, L., Jay Kim, J.H., and Yi, S.T. (2008) Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars. *Cement and Concrete Composites*. 30 (7), 603–611.
- [26] Kim, S.W., Yun, H. Do, Park, W.S., and Jang, Y. Il (2015) Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete. *Materials and Design*. 83 257–269.