

تجزیه و تحلیل مدل‌های ریاضی پیش‌بینی مقاومت‌های مکانیکی بتن‌های مسلح به الیاف فولادی به روش تجربی و مبتنی بر یادگیری ماشین

محمدحسین تقوی پارسا^۱، مرتضی اسماعیلی^۲، محمدرضا عدل‌پرور^{۳*}

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران، mh.taghavi@stu.qom.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، m_esmaeili@iust.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران، adlparvar@qom.ac.ir

چکیده

هدف از مقاله حاضر، ارائه مدل ریاضی بهینه برای پیش‌بینی مقاومت‌های مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی است. برای این منظور ضمن مطالعه و بررسی آزمایشگاهی روابط محققین قبلی برای پیش‌بینی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی مسلح شده با الیاف فولادی، روابط ریاضی بهینه حاکم بر مسئله به روش یادگیری ماشین^۱ بررسی شده است. نمونه‌های بتن‌های مسلح به الیاف فولاد آزمایش شده با استفاده از الیاف به اشکال صاف، موجدار و دوسرقلاب در مقیاس ماکرو ساخته شده است. طی این تحقیق روابط ریاضی مستخرج از روش یادگیری ماشین که با استفاده از مدلسازی پیش‌بینی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن‌های مسلح به الیاف فولادی و با به کارگیری روش رگرسیون نمادی^۲ بر مبنای یک پایگاه داده‌ی مشتمل بر ۲۲۸۳ داده‌ی بین المللی بررسی می‌گردد. کارایی مدل‌های به کار گرفته شده در این تحقیق با استفاده از سنج‌های آماری تجزیه و تحلیل خطا نظیر $RMSE^3$ و $MAPE^4$ سنجیده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های سائز بزرگترین سنگدانه، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری بتن شاهد، نسبت آب به سیمان، درصد حجمی و طول الیاف، نسبت ابعادی الیاف و مقاومت کششی یا خمشی مرتبط با نوع خروجی مورد بررسی برای بتن الیافی بیشترین اثر را بر روی پیش‌بینی مقاومت دارند. در نهایت نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است با دقتی بالاتر از روش‌های تجربی و تحلیلی کلاسیک، مقاومت‌های مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی را تعیین و به طور میانگین دقت پیش‌بینی مقاومت‌های مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی^۵ را تا ۳۴٪ بهبود دهد.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، یادگیری ماشین، روابط تجربی، الیاف فولادی، الگوریتم‌های مدلسازی.

¹ Machine learning

² Symbolic regression

³ Root Mean Square Deviation (RMSE)

⁴ The Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

⁵ Steel Fiber Reinforced Concrete

در حال حاضر پیش بینی خواص مقاومتی ماده‌ای مانند بتن که به طور گسترده در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسط روش‌های مستقیم و غیر مستقیم ممکن است. محققین در روش مستقیم با استفاده از ابزارهای تجربی، هزینه و زمان زیادی را برای تولید نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها ۲۸ روزه و حتی بیشتر صرف می‌کنند. با این وجود، در روش‌های غیر مستقیم، دانشمندان از مدل‌های عددی توسعه یافته بر مبنای آمار جهت پیش بینی خواص بخش‌هایی از تابع هدف که نمونه‌های تجربی بر اساس آن آزمایش شده‌اند، بهره می‌برند. مزیت استفاده از این روش‌ها در این است که تعداد آزمایش‌ها را کاهش داده و در نتیجه موجب کاهش زمان و هزینه نیز خواهند شد. تا پیش از ظهور هوش مصنوعی بسیاری از این روش‌ها در تئوری امید بخش بوده ولی به دلیل بالا بودن خطای تجمعی در مقایسه با روش مستقیم و استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی کارآمد و موثر نبودند. یکی از این دلایل کاستی‌ها، جمع کردن داده‌ی ناکافی برای پایگاه داده اولیه بوده است. بنابراین در چنین شرایطی، پیشنهاد روش‌های نوین نظیر یادگیری ماشین برای حل چنین مشکلاتی در پیش‌بینی از اهمیت خاصی برخوردار است.

استفاده از الیاف به ویژه الیاف فولادی در بتن به حدود ۵۰ سال پیش باز می‌گردد. رفتار و مکانیزم عملکردی الیاف در بتن به این صورت است الیاف با پل زدن بر روی ترک‌های ایجاد شده در بتن مانع از رشد و گسترش ترک‌ها شده و بدین ترتیب خواص مکانیکی بتن را ارتقا می‌دهند [۱].

به طور کلی مدل‌های ارائه شده برای مقاومت بتن الیافی شامل دو دسته می‌شوند. دسته اول مدل‌های ارائه شده برحسب مقاومت فشاری بتن شاهد f'_c و درصد حجمی الیاف V_f و دسته دوم مدل‌های ارائه شده برحسب مقاومت فشاری بتن شاهد f'_c درصد حجمی الیاف V_f و نسبت طول به قطر آنها l/d . بنابراین مطابق با معادله (۱)، کلیه مدل‌های ارائه شده برای مقاومت بتن الیافی به صورت تابعی از این عوامل است:

$$f'_{sf}(t) = F(f'_c, V_f, l/d) \quad (1)$$

در ابتدایی‌ترین فرضیه که در مطالعات پیشین بتن الیافی به آن اشاره شده است، مقاومت‌های بتن الیافی (فشاری، کششی و خمشی) تابعی از درصد حجمی الیاف و مقاومت بتن شاهد (بدون الیاف) می‌باشد، چرا که الیاف با پل زدن بر روی ترک‌ها قابلیت افزایش مقاومت بتن را داراست و مطابق تحلیل صورت گرفته در این مقالات با افزایش درصد الیاف، مقاومت‌ها افزایش می‌یابد. البته در برخی مقالات مقاومت بتن الیافی با درصد الیاف رابطه مستقیم داشته و در برخی دیگر روابط به صورت درجه دوم مطرح شده‌اند.

در سال ۱۹۹۶، خالو و کیم [۲] به منظور پیش بینی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی در محدوده مقاومت‌های متوسط تا زیاد روابطی ارائه دادند که در این روابط مقاومت‌های نام برده شده برای بتن الیافی برحسب مقاومت فشاری بتن شاهد (f'_c) و درصد حجمی الیاف (V_f) بیان شده است. این روابط در معادلات ۴-۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که روابط مذکور برای بتنی با هر نوع سیمان بوده و سن آزمایش ۲۸ روز می‌باشد.

$$f'_{cf} = f'_c (1 + 0.568V_f - 0.303V_f^2) \quad (2)$$

$$f_{tf} = \sqrt{f'_c} (0.67 + 0.1256V_f - 0.0116V_f^2) \quad (3)$$

$$f_{rf} = \sqrt{f'_c} (0.68 + 0.206V_f - 0.085V_f^2) \quad (4)$$

روابط ارائه شده براساس آزمایش بر روی ۴۰ نمونه که از ۴ طرح اختلاط مختلف تهیه شده بودند، به دست آمد و خطای روابط ۳۰٪ گزارش شد.

در سال ۲۰۰۴ سونگ و هوانگ [۳] اقدام به تصحیح مدل‌های ارائه شده توسط خالو و کیم کردند؛ زیرا در روابط ارائه شده قبلی رده مقاومتی بتن از ۳۰ تا ۶۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده بود و چنین مدل‌هایی پیش‌بینی مناسبی از مقاومت بتن‌های بالای ۶۰ مگاپاسکال نمی‌داد و با خطای ۳۰٪ برای این رده مقاومتی همراه بود. آنها آزمایش‌ها بر روی ۴۰ نمونه که بر اساس ۴ طرح اختلاط با درصد الیاف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ تهیه شده بودند، انجام دادند. در نهایت خطای مدل‌های خود را برای بتن‌های پر مقاومت ۸٪ گزارش کردند. البته نکته مهم در این است که به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر طول الیاف، روابط ارائه شده در مدل‌های خالو و کیم و همچنین سونگ و هوانگ قابل تعمیم به داده‌های سایر محققین نیست و فقط داده‌های خود را پوشش می‌دهند چرا که در ادامه همانطور که بحث خواهد شد، ویژگی نسبت طول به قطر الیاف در تعیین مقاومت بتن الیافی بسیار حائز اهمیت است که در این مقالات به آنها اشاره نشده است. براساس نتایج به دست آمده، مقاومت فشاری بتن الیافی (f'_{cf}) بر حسب مقاومت فشاری بتن شاهد (f'_c) و مقدار الیاف به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f'_{cf} = 85 + 15.12V_f - 4.71V_f^2 \quad (5)$$

مقاومت کششی (f_{tf}) و خمشی (f_{rf}) بتن الیافی پرمقاومت نیز برحسب درصد الیاف به صورت زیر تعریف شده است:

$$f_{tf} = 5.8 + 3.01V_f - 0.02V_f^2 \quad (6)$$

$$f_{rf} = 6.4 + 3.43V_f + 0.32V_f^2 \quad (7)$$

در سال ۱۹۹۲، عزالدین و بالاگورو [۴] با در نظر گرفتن سه ویژگی مقاومت فشاری بتن شاهد، درصد حجمی الیاف و نسبت طول به قطر اقدام به ارائه مدل‌هایی براساس نتایج آزمایش‌های خود کردند. الیاف مورد استفاده به ترتیب با نسبت‌های (طول/قطر) ۵۰/۵۰، ۶۰/۸۰ و ۳۰/۵ میلی‌متر بوده است که دارای نسبت طول به قطر ۷۵، ۱۰۰ و ۶۰ بودند. مقاومت فشاری نمونه شاهد نیز در این تحقیق ۳۶ مگاپاسکال بوده است. نکته حائز اهمیت آن است که در این مدل‌ها ویژگی‌ای به نام اندیس مسلح‌کنندگی الیاف فولادی^۱ مطرح شد که نشان از آن دارد که درصد حجمی و نسبت طول به قطر دو ویژگی مجزا از هم نبوده و به صورت مرتبط با هم در تامین مقاومت عمل می‌کنند. مدل ارائه شده برای مقاومت فشاری بتن الیافی با توجه به مقاومت متوسط بتن به صورت زیر است:

$$f'_{cf} = f'_c + 3.51RI_w \quad (8)$$

$$RI_w = w_f \frac{l}{d} \quad (9)$$

¹ Steel Fiber-Reinforcing Index

که در آن (f'_c) و (f'_{cf}) به ترتیب مقاومت فشاری نمونه شاهد و الیافی، (RI_w) اندیس مسلح کنندگی الیاف، (Wf) درصد وزنی الیافی در بتن، (l) و (d) به ترتیب طول و قطر الیاف می‌باشند. در این تحقیق، محققین دقت مدل خود را برای بتن‌های با مقاومت متوسط ۹۰٪ گزارش کردند، در حالی که برای نمونه های خارج از محدوده تعریف شده دقت عمل مدل تا ۴۰٪ کاهش داشت.

در سال ۱۹۹۹، ناتاراجا و همکاران [۵] اقدام به تصحیح روابط ارائه شده توسط عزالدین و همکاران کردند؛ چرا که روابط ارائه شده توسط آنها برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط ارائه شده بود. به همین دلیل ضرایب روابط با تغییری کوچک تصحیح گردید تا برای بتن‌های پر مقاومت قابل استفاده باشد. الیاف مورد استفاده آنها به ترتیب با نسبت (طول/ قطر) $0.5/28$ و $0.5/41$ بر حسب میلیمتر بودند. مقاومت فشاری نمونه شاهد در این تحقیق ۷۰ و ۸۳ مگاپاسکال بوده است. مدل ارائه شده توسط آنها با استفاده از همان ویژگی‌های قبلی، برای مقاومت فشاری متناظر با حداکثر بار فشاری بتن الیافی به صورت زیر بیان شد:

$$f'_{cf} = f'_c + 2.16RI_w \quad (10)$$

یازپچی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۶ روابطی ارائه دادند تا در آنها تاثیر درصد حجمی و نسبت طول به قطر الیاف را جدا از هم ببینند. نتایج به دست آمده و خطای زیاد روابط، حاکی از آن است که روابط قبلی ارائه شده که تاثیر درصد حجمی و نسبت طول به قطر را طی یک ویژگی (اندیس مسلح کنندگی) در نظر می‌گرفتند، تخمین بهتری از مقاومت ارائه می‌دادند.

$$f_c (MPa) = 50.5 + 0.043 \frac{l}{d} + 1.97V_f (\%) \quad R^2 = 0.10 \quad (11)$$

$$f_{st} (MPa) = 2.21 + 0.008 \frac{l}{d} + 1.42V_f (\%) \quad R^2 = 0.72 \quad (12)$$

$$f_f (MPa) = 0.83 + 0.064 \frac{l}{d} + 3.00V_f (\%) \quad R^2 = 0.77 \quad (13)$$

در روابط فوق (f_c) ، (f_{st}) ، (f_f) به ترتیب مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی، $(\frac{l}{d})$ نسبت طول به قطر الیاف و (V_f) درصد حجمی الیاف است. همانطور که قابل مشاهده است با توجه به ویژگی R^2 که دقت متغیرهای پیش‌بینی در مدل رگرسیون را بیان می‌کند؛ روابط ارائه شده برای مقاومت خمشی پاسخ بهتری داده است. توجه داشته باشید که مقدار R^2 بین ۰ و ۱ است و هرچه مقدار به ۱ نزدیکتر باشد، رابطه بین متغیرهای پیش‌بینی کننده و متغیر پاسخ قوی‌تر است.

توماس و راماسوامی [۷] در سال ۲۰۰۷ رابطه‌ای کلی (رابطه ۱۴) برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن الیافی ساخته شده از نمونه‌های سیلندری که براساس نتایج آزمایش بر روی ۶۰ نمونه بوده است، ارائه دادند.

$$f_c = f_{c_0} + 0.014 f_{c_0} R + 1.363R \quad (14)$$

که (f_{c_0}) مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۲۸ روز و (R) اندیس مسلح کنندگی الیاف است.

در سال ۲۰۱۲، او و همکاران [۸] اقدام به تصحیح روابط عزالدین و همکاران و همچنین ناتاراجا و همکاران کردند چرا که این روابط صرفاً برای بتن‌های با مقاومت متوسط و زیاد مطرح شده بود. بنابراین طی انجام آزمایش بر روی بتن‌های الیافی با مقاومت زیر ۳۰ مگاپاسکال ضرایب روابط تغییر یافت. ابعاد طول به قطر الیاف مورد استفاده به صورت $0.5/30$ و $1/50$ و $1/60$ ، $0.5/35$ و $0.5/50$ بر حسب میلیمتر بوده است که نسبت طول به قطر از ۵۰ تا ۱۰۰ تغییر می‌نمود. مقاومت فشاری نمونه شاهد

در این تحقیق از ۱۵ تا ۲۵ متغیر بوده است. مدل ارائه شده برای مقاومت فشاری متناظر با حداکثر بار فشاری بتن الیافی به صورت زیر مطرح شده است.

$$f_{cf}' = f_c' + 2.35RI_v \quad (15)$$

$$RI_v = V_f \frac{l}{d} \quad (16)$$

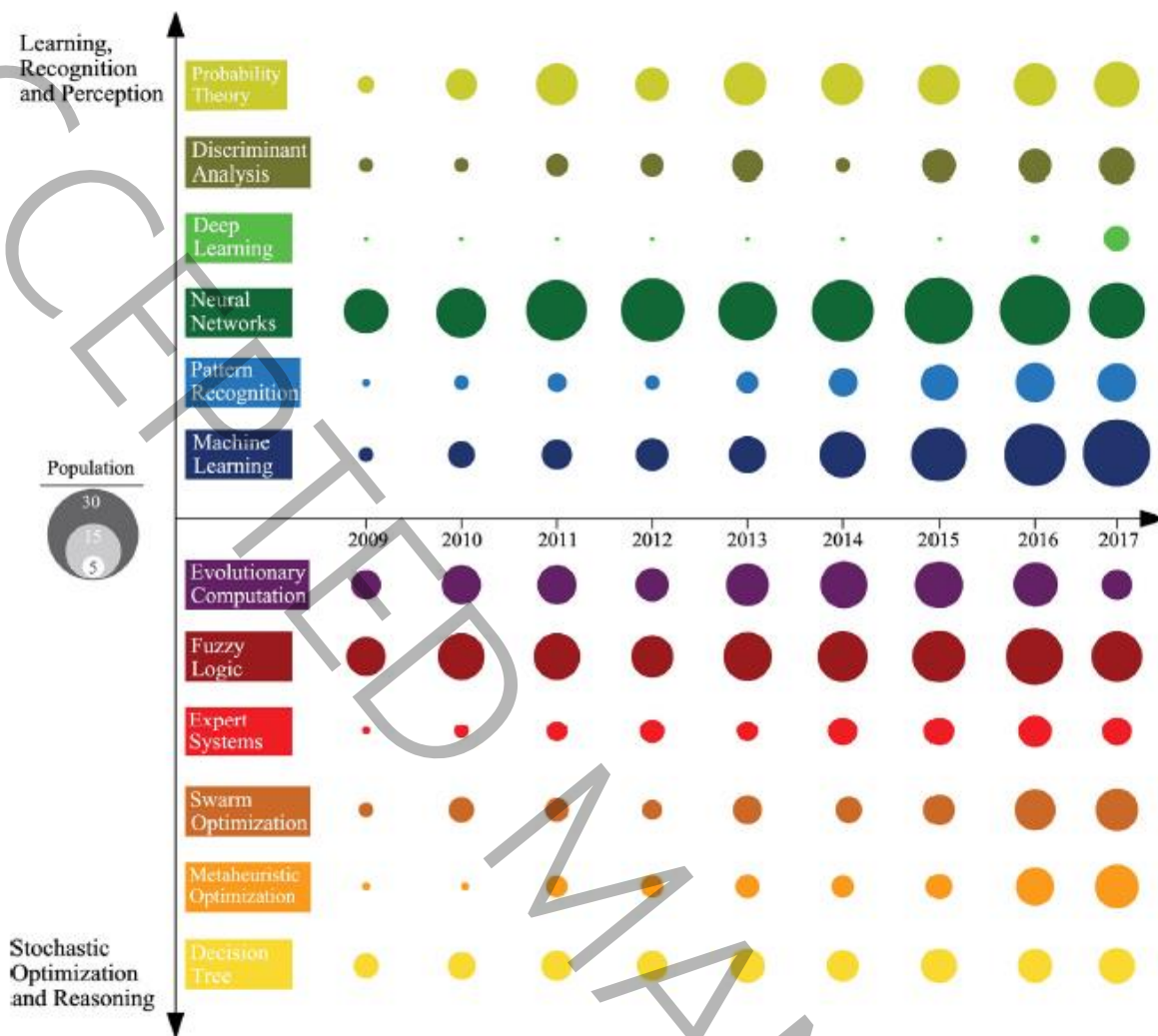
همچون روابط قبلی، در این روابط (V_f) درصد حجمی الیاف فولادی، (RI_v) اندیس مسلح‌کنندگی الیاف، (f_c') و (f_{cf}') به ترتیب مقاومت فشاری نمونه بتن شاهد و بتن الیافی و نیز (l/d) نسبت طول به قطر الیاف می‌باشد. محققین ضمن ارائه روابط به این نکته اشاره کردند که روابط قبلی تخمین مناسبی از مقاومت بتن الیافی با مقاومت کم (از ۱۵ تا ۲۵ مگاپاسکال) نداشت (خطای بالای ۲۰٪). درحالی‌که روابط با ضرایب تصحیح شده خطایی معادل ۷٪ داشتند.

همانطور که اشاره گردید، روابط موجود در مقالات در زمینه بتن و همچنین بتن الیافی که برای پیش‌بینی مقاومت ارائه شده‌اند، حداکثر برحسب ۳ ویژگی اقدام به تخمین می‌کنند. بنابراین استفاده از مدلی که بتواند ویژگی‌های زیادی را در خود گنجانده و تخمین مناسبی از مقاومت داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی با توجه به تعداد محدود نمونه‌های در نظر گرفته شده نتایج بحث قابل تعمیم به سایر حالات نیست. این کار با استفاده از روش هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین قابل دسترسی است تا با استفاده از مجموعه‌ای کافی از داده‌ها، مدلی با متغیرهای بیشتر ارائه و بدون نیاز به صرف زمان و هزینه ساخت نمونه، مقاومت بتن را پیش‌بینی نمود.

پس از گسترش کاربرد یادگیری ماشین در مهندسی سازه، به تدریج این روش در سایر زیرمجموعه‌های این رشته از جمله مصالح نیز کاربرد فراوان پیدا کرده است به گونه‌ای که طی پنج سال اخیر تحقیقات زیادی در رابطه با کاربرد یادگیری ماشین در زمینه تکنولوژی بتن صورت گرفته است. در سال ۲۰۱۸ در دانشگاه میشیگان تحقیقی توسط صالحی و همکاران [۹] برای یک بازه ده ساله بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۷ بر روی روند استفاده از روش‌های مختلف هوش مصنوعی در تحقیقات مهندسی عمران بر حسب تعداد مقالاتی که از این روش‌ها استفاده نموده‌اند، انجام گرفت (شکل ۱). مطابق نتایج تحقیق، استفاده از روش یادگیری ماشین نسبت به سایر روش‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه‌های عصبی، بهینه‌سازی، تئوری احتمال و ... روند صعودی دارد.

در همین راستا در سال ۲۰۱۴ برای نخستین بار آچیکجی‌جی و همکاران [۱۰] برای پیش‌بینی مقاومت برشی بتن مسلح به الیاف فولادی با استفاده از ۱۳۳ داده آزمایشگاهی اقدام به مدلسازی کردند. ویژگی‌های ورودی در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل اسلامپ یا روانی بتن، مقاومت فشاری بتن شاهد، حداکثر اندازه سنگدانه، درصد حجمی الیاف، طول الیاف و قطر الیاف بود. آنها با پیاده سازی الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی یک مدلسازی ساده به روش یادگیری ماشین انجام دادند.

مرادی و همکاران [۱۱] نیز در سال ۲۰۱۶ با استفاده از ۳۶۷ داده آزمایشگاهی نسبت به ارائه یک رابطه تخمین مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی اقدام کردند. لازم به ذکر است روش استفاده شده توسط آنها از نوع یادگیری ماشین نبوده و صرفاً از طریق کدنویسی داخل نرم‌افزار متلب به روش الگوریتم ژنتیک رابطه خود را ارائه نمودند. ویژگی‌های ورودی اثرگذاری که آنها در تحقیق خود مدنظر قرار دادند نیز شامل مقاومت فشاری بتن شاهد، نسبت طول به قطر الیاف، درصد حجمی الیاف و مقاومت کششی خود الیاف بود. میانگین خطای روابط ارائه شده توسط مرادی و همکاران در تحقیق خود ۱۵ درصد اعلام شد که عملکردی بهتری نسبت به روابط تجربی قبلی داشت.



شکل (۱): فراوانی تحقیقات صورت گرفته با استفاده از هوش مصنوعی در مهندسی عمران [۹]

Figure (1): Frequency of studies conducted using artificial intelligence in civil engineering [9]

در تحقیقی لو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰ یک روش یادگیری ماشین جدید که براساس مدل‌های درختی است انتخاب کردند تا ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی را تخمین بزنند. در این تحقیق محققان با استفاده از مدل‌های درختی مانند درخت تصادفی (RF)، درخت رگرسیون (RT) و طبقه‌بندی (CART) و همچنین یک روش ابداعی جدید (FS) ظرفیت برشی را تخمین زدند. به منظور اجرای مرحله یادگیری داده‌ها، مجموعه‌ای از ۱۴۰ نمونه با شش مولفه تاثیرگذار شامل عمق دال، عمق موثر دال، طول ستون، مقاومت فشاری بتن، نسبت تقویت و مقدار الیاف در نظر گرفته شدند. به منظور بررسی دقت مدل‌های پیشنهادی برای آزمایش کردن و یادگیری، شاخص‌های آماری شامل R^2 و خطای مربعات میانگین استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که استفاده از روش ابداعی درخت تصادفی (FS-RF) در مقایسه با مدل‌های روش ابداعی درخت رگرسیون (FS-RT) نتایج بهتری از نظر دقت به همراه دارد.

در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۲۰ انجام گرفت، لای و همکاران [۱۳] یک روش محاسباتی به منظور پیش‌بینی ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتنی مسلح به الیاف فولادی ارائه دادند. آنها دو الگوریتم یادگیری ماشین ترکیبی ایجاد کردند که شبکه عصبی

(ANN) را با دو تکنیک بهینه‌سازی متمایز یعنی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کرم شب تاب ترکیب می‌کند. مجموعه‌ای از ۴۶۳ داده آزمایشگاهی از منابع معتبر موجود برای توسعه مدل‌ها جمع‌آوری گردید. پس از ساخت، صحت‌سنجی و انتخاب بهترین مدل براساس معیارهای آماری متداول، مقایسه‌ای میان آن‌ها با معادلات تجربی موجود انجام گرفت. همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی اهمیت متغیر ورودی و آشکارشدن وابستگی ویژگی‌های سازه‌ای به ظرفیت برشی نهایی انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده توسط ترکیبی از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری در مقایسه با مدل ارائه شده توسط ترکیبی از شبکه عصبی و الگوریتم کرم شب تاب دارد. همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که پهنای جان، عمق موثر و نسبت عمق آزاد مهمترین ویژگیها در مدل‌سازی ظرفیت برشی تیر بتنی مسلح به الیاف هستند.

در سال ۲۰۲۱، رحمان و همکاران [۱۴] با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین ظرفیت برشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف را پیش‌بینی کردند. بر این اساس ۵۰۷ سری داده‌ی به دست آمده از تحقیقات گذشته جمع‌آوری و تحت آموزش قرار گرفت. متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل نسبت طول دهانه برشی به عمق موثر، مقاومت فشاری بتن، نسبت آرماتورهای طولی، مقدار الیاف، نسبت طول به قطر الیاف و نوع الیاف است. ۱۱ مدل یادگیری ماشین که عبارتند از رگرسیون خطی، رگرسیون مرزی، رگرسیون طنابی، درخت تصمیم‌گیری، درخت تصادفی، ماشین برداری پشتیبان، همسایگی k، شبکه عصبی مصنوعی، XGBoost، AdaBoost و CatBoost ارزیابی شدند تا ظرفیت برشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف پیش‌بینی شود. در میان روش‌های ارائه شده، روش XGBoost با خطای ۱۰ درصد دارای بهترین عملکرد بوده است. همچنین مطالعه اهمیت ویژگی‌های ورودی نشان داد که نسبت طول دهانه برشی به عمق موثر، مقدار آرماتورهای طولی، مقاومت بتن و مقدار حجمی الیاف مهم‌ترین ویژگیهای ظرفیت برشی هستند.

الاتیبی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۱ از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند آموزش‌دهنده رگرسیونی، جنگل تصادفی، ماشین برداری پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری، رگرسیون گاوس و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند تا ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی مسلح به الیاف را تخمین بزنند. یک ارزیابی جامع از شش روش اشاره شده با توجه به دقت و بازدهی مدل‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر روش‌های یادگیری ماشین از نظر دقت عملکرد بهتری داشت. همچنین تحلیل نتایج نشان داد که عمق موثر دال بیشترین تاثیر را بر روی ظرفیت برش پانچ دارد و بعد از آن بیشترین اثرگذاری مربوط به عرض بارگیری دال و مقاومت فشاری بتن است.

اولالوسی و اوویرا [۱۶] در سال ۲۰۲۱ ظرفیت برشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف را با استفاده از یادگیری ماشین تخمین زدند. در این تحقیق روش‌های رگرسیون گاوس (GPR) و تکنیک درخت تصادفی (RF) استفاده شد تا مقاومت برشی نهایی تیرهای بتنی مسلح به الیاف بدون خاموت‌های عرضی پیش‌بینی شود. مدل‌های ارائه شده براساس ۳۲۶ داده‌ی به دست آمده در تحقیقات گذشته بوده است که ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و بقیه برای صحت‌سنجی استفاده شدند. عملکرد مدل‌های ارائه شده با مقایسه آماری نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های طراحی برشی موجود در آیین‌نامه‌ها (fib Model Code 2010) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مقادیر پیش‌بینی مدل‌های یادگیری ماشین تا حد قابل قبولی معادل نتایج آزمایشگاهی و سایر معادلات موجود در منابع بود. با این حال نسبت به معادلات موجود از دقت بیشتری برخوردار بوده است.

در سال ۲۰۲۱، کانگ و همکاران [۱۷] با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی را پیش‌بینی کردند. بر این اساس ۲۲۰ داده به دست آمده از تحقیقات گذشته جمع‌آوری و تحت آموزش قرار گرفت. متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل نسبت نسبت آب به سیمان، نسبت سنگدانه ریزدانه، اندازه

بزرگترین سنگدانه درشت دانه، روان کننده، دوده سیلیس، درصد حجمی الیاف و نسبت طول به قطر الیاف است. در این تحقیق ۱۱ مدل یادگیری ماشین که عبارتند از رگرسیون خطی، رگرسیون مرزی، رگرسیون طنابی، درخت تصمیم‌گیری، درخت تصادفی، ماشین برداری پشتیبان، همسایگی k ، شبکه عصبی مصنوعی، XGBoost، AdaBoost و Gradient Boosting جهت پیش‌بینی استفاده شده است. در میان روش‌های ارائه شده، روش XGBoost برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و روش Gradient Boosting در تخمین مقاومت خمشی دارای بهترین عملکرد بوده است. همچنین مطالعه اهمیت ویژگی‌های ورودی نشان داد که در مقاومت فشاری نسبت آب به سیمان و ماده افزودنی دوده سیلیس نقش موثر را داشتند و بر روی مقاومت خمشی مقدار حجمی الیاف و ماده افزودنی دوده سیلیس مهم‌ترین ویژگی‌های اثرگذار هستند.

همچنین در سال‌های اخیر، پژوهشگران متعددی به بررسی مدل‌های ریاضی و داده‌محور برای پیش‌بینی مقاومت‌های مکانیکی بتن‌های مسلح به الیاف فولادی (SFRC) پرداخته‌اند. این مطالعات با هدف کاهش هزینه‌ها، زمان و پیچیدگی آزمایش‌های سنتی، به‌ویژه در پیش‌بینی مقاومت فشاری، خمشی و برشی بتن‌های الیافی، رو به گسترش بوده‌اند.

اخیراً و در سال ۲۰۲۲ لی و همکاران [۱۸] با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین شامل SVR و ترکیبات آن با روش‌های Bagging و AdaBoost به پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های SFRC پرداختند. هدف آن‌ها ارائه مدلی دقیق و سریع برای جایگزینی آزمایش‌های فیزیکی بود. نتایج نشان داد که مدل SVR-AdaBoost با ضریب تعیین R^2 برابر ۰٫۹۶ بهترین عملکرد را داشت. در ادامه، ژنگ و همکاران [۱۹] با گردآوری پایگاه داده‌ای گسترده از مطالعات پیشین، مدل‌های مختلف ML^1 از جمله Gradient Boosting و Random Forest را برای پیش‌بینی مقاومت خمشی توسعه دادند و به دقت R^2 برابر ۰٫۹۶ در مدل GB دست یافتند.

در حوزه مقاومت برشی، شاتناوی و همکاران [۲۰] با توسعه یک مدل مبتنی بر الگوریتم درخت تصمیم^۲ و استفاده از روش SHAP برای تحلیل توضیح‌پذیری مدل، به ارزیابی تیرهای باریک SFRC پرداختند. آن‌ها دریافتند که نسبت عرض تیر و عمق مؤثر از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی مقاومت برشی است.

در سال ۲۰۲۴ و در حوزه کاربرد در دماهای بالا، علی و همکاران [۲۱] الگوریتم‌های GEP و XGBoost را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری SFRC در شرایط حرارتی بالا بررسی کردند. مدل GEP دقت بالا و پایداری مناسبی در پیش‌بینی نشان داد و مشخص شد که حجم الیاف فولادی تا حد ۱٫۵ درصد باعث بهبود مقاومت می‌شود. همچنین چنگ و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای نوآورانه، از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی مقاومت پانچ در دال‌های SFRC استفاده کردند و نتایج نشان داد که داده‌سازی مصنوعی باعث افزایش دقت مدل در مجموعه‌های داده محدود می‌شود.

تحقیقات صورت گرفته در این حوزه مسیر تکاملی واضحی را از مدل‌های کلاسیک و آماری به سمت روش‌های یادگیری ماشین و سپس به سوی الگوریتم‌های پیچیده‌تر همچون یادگیری ژرف و مدل‌های ترکیبی نشان می‌دهد. آنچه از مرور ادبیات فنی برمی‌آید در ابتدا تمرکز بر مقاومت فشاری بوده، سپس مقاومت خمشی و برشی در اولویت قرار گرفته و اخیراً شرایط خاص مانند دماهای بالا یا بارگذاری دینامیکی نیز مورد توجه واقع شده‌اند [۲۳-۲۵].

¹ Machine Learning

² Gradient Boosting Regression Tree (GBRT)

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، چندین خلأ تحقیقاتی همچنان وجود دارد. نخست آنکه، اغلب مدل‌ها تنها بر یک نوع مقاومت مکانیکی تمرکز دارند و مدل‌های جامع و چندهدفه که بتوانند هم‌زمان مقاومت فشاری، خمشی و برشی را پیش‌بینی کنند، کمیاب هستند. دوم، نبود تلفیق ساختارهای تحلیلی-ریاضی کلاسیک با یادگیری ماشین، که می‌تواند موجب تفسیرپذیری بهتر مدل‌ها شود، به وضوح احساس می‌شود. سوم، بسیاری از پژوهش‌ها فاقد داده‌های کافی در شرایط مرزی مانند دمای بالا یا بارگذاری‌های خاص هستند که استفاده از روش‌های داده‌سازی مصنوعی را ضروری می‌سازد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک مدل یادگیری ماشین ترکیبی و توضیح‌پذیر برای پیش‌بینی هم‌زمان مقاومت‌های مکانیکی بتن‌های الیافی و تحلیل ویژگی‌ها، گامی اساسی در رفع این نارسایی‌های علمی و کاربردی خواهد بود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- داده کاوی

در این پژوهش روابط ریاضی مستخرج از روش یادگیری ماشین با رابطه‌های پیشین حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه گردیده و نتایج پیش‌بینی مقاومت‌های SFRC توسط این روابط مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این منظور ابتدا یک پایگاه داده مشتمل بر ۲۲۸۳ داده‌ی بین‌المللی ایجاد گردید. داده‌های استخراج شده با توجه به مرور ادبیات فنی موضوع شامل پارامترهای موثر بر مقاومت مکانیکی SFRC نظیر نسبت آب به سیمان، مقدار و نوع الیاف، مقاومت‌های بتن شاهد و ... بودند که به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شد. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی بر حسب نوع مقاومت و دسته‌بندی الیاف به کار برده شده در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مشخصات نمونه‌های مورد بررسی بر حسب نوع الیاف و نوع آزمایش

Table (1): Specifications of the investigated specimens based on fiber type and test type

نوع مقاومت	تعداد کل نمونه‌ها	شکل الیاف	تعداد نمونه
مقاومت فشاری	۲۰۱۵	بتن شاهد	۳۱۲
		صاف	۲۴۷
		موجدار	۲۲۴
		دو سر قلاب	۱۲۳۲
مقاومت کششی	۱۲۱۶	بتن شاهد	۱۹۵
		صاف	۱۳۹
		موجدار	۱۴۶
		دو سر قلاب	۷۳۶
مقاومت خمشی	۱۱۹۷	بتن شاهد	۱۴۷
		صاف	۱۵۷
		موجدار	۱۵۶
		دو سر قلاب	۷۳۷

۲-۲- مراحل تحقیق

در فاز اول، چندین الگوریتم یادگیری ماشین از جمله رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، درخت تصمیم، جنگل تصادفی و مدل‌های توسعه یافته مبتنی بر آن، شبکه‌های عصبی و ... برای پیش‌بینی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی به کار گرفته شدند. در فاز دوم، جهت تعیین پارامترهای مؤثر بر مقاومت مکانیکی SFRC سه روش PCA، Ridge و Lasso مورد استفاده قرار گرفت و در نتیجه آن نسبت آب به سیمان، طول به قطر و مقاومت‌های بتن شاهد تاثیرگذارترین ویژگی‌ها تعیین شدند. در فاز سوم مدل ریاضی تعیین مقاومت‌های SFRC با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین بدست آمد. لازم به ذکر است که مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده، با روش‌های ریاضی، از جمله معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای میانگین قدر مطلق (MAPE) ارزیابی شدند.

۲-۳- انتخاب ویژگی‌های مؤثر

در این تحقیق، آماده‌سازی داده‌ها و انتخاب ویژگی به روش متداول در یادگیری ماشین [۲۳] و مطابق با شکل ۲ انجام شد. استراتژی انتخاب ویژگی‌های مؤثر بر مبنای کنترل بیش‌آموزی^۱ اتخاذ گردید [۲۴] تا از بروز خطاهای عددی و افت تعمیم‌پذیری مدل جلوگیری شود. در این فرآیند، ویژگی‌ها به صورت تدریجی وارد مدل شده و عملکرد آن در هر مرحله بر اساس معیارهای RMSE و MAPE در داده‌های آموزش و اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. ویژگی‌هایی که منجر به بهبود عملکرد مدل در داده‌های آموزشی اما کاهش دقت در داده‌های اعتبارسنجی می‌شدند، به عنوان عوامل مستعد بیش‌آموزی شناسایی و از مجموعه نهایی حذف شدند. سپس برای اطمینان از پایداری نتایج، از روش اعتبارسنجی متقابل^۲ استفاده شد. لازم به ذکر است در بکارگیری از این روش مقدار k برابر با ۵ (پنج‌تایی) استفاده شد تا دقت مدل در چندین تقسیم‌بندی مجزا از داده‌ها ارزیابی گردد. در این روش، داده‌ها به پنج زیرمجموعه تقسیم شدند و مدل در پنج تکرار مجزا آموزش دید تا میانگین عملکرد آن به عنوان معیار ارزیابی نهایی در نظر گرفته شود. این فرایند موجب شد وابستگی مدل به نمونه‌های خاص کاهش یافته و پایداری نتایج تضمین گردد.

همچنین، در مراحل نهایی آموزش مدل، از روش‌های منظم‌سازی^۳ شامل روش Ridge و Lasso استفاده گردید. این روش‌ها با افزودن جریمه به تابع هزینه و کنترل اندازه ضرایب، از رشد بیش از حد پارامترها جلوگیری کرده و در نتیجه از بروز بیش‌آموزی ممانعت می‌کنند. افزون بر آن، روش Lasso با صفر کردن برخی ضرایب، فرایند انتخاب خودکار ویژگی‌های مؤثر را نیز تسهیل نمود.

به این ترتیب طبق شکل ۲، مرحله نخست به تقسیم داده‌ها بر اساس نوع الیاف اختصاص دارد. در بخش بعدی مشاهده می‌شود که هر ویژگی بر مقاومت‌های مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی اثر متفاوتی دارد. پس از این مرحله، داده‌های بتن غیرمسلح از مجموعه داده حذف شد تا داده‌های پرت از ورودی الگوریتم پیش‌بینی کنار گذاشته شوند. در نهایت، ویژگی‌ها به‌طور جداگانه بر اساس نوع الیاف و نوع مقاومت مورد بررسی تحلیل شدند. این راهبرد پیش‌تر در پژوهش [۲۵] نیز پیشنهاد و اثربخشی آن تأیید شده است.

¹ Overfitting-based Feature Selection

² k-fold Cross-validation

³ Regularization

در نهایت ۹ ویژگی موثر بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی شامل سائز بزرگترین سنگدانه (X_1) مدول الاستیسیته، (X_2) مقاومت فشاری بتن شاهد، (X_3) نسبت آب به سیمان، (X_4) درصد حجمی الیاف، (X_5) طول الیاف، (X_6) نسبت ابعادی الیاف و (X_7) مقاومت کششی یا خمشی مرتبط با نوع خروجی الیاف تعیین گردید.

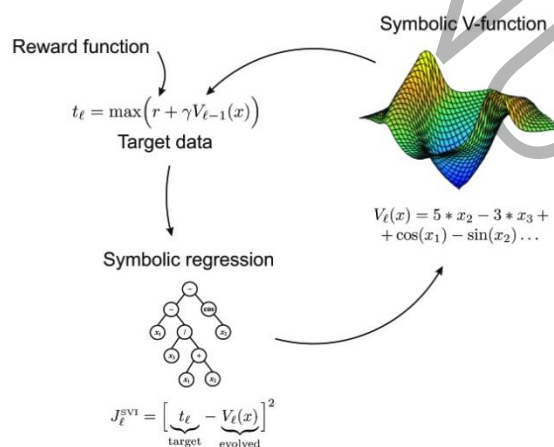


شکل (۲): فرآیند آماده‌سازی داده و انتخاب ویژگی [۲۵]

Figure (2): Data preparation and feature selection process [25]

۴-۲- تعیین روابط پیش‌بینی مقاومت‌های مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی با روش رگرسیون نمادی^۱

این روش از الگوریتم‌های دسته‌ی درخت تصمیم‌گیری است که با استفاده از ویژگی‌های مسئله، نتایج را با عملگرهای ریاضی تولید می‌کند [۲۶]. در این الگوریتم مدلسازی هر یک از این شاخه‌ها بر اساس دقت خود مرتب می‌شوند. در نهایت، فرمولاسیون با بهترین عملکرد ترکیب خواهد شد. همچنین، برخی از تغییرات ممکن است به طور تصادفی برای همان عملگر جهش اعمال شود. سپس درختان تولید شده در تکرارهای قبلی مجدداً ترکیب و رتبه‌بندی می‌شوند و این رویه تا ارضاء شدن معیار خاتمه، ادامه می‌یابد. به این ترتیب در نتیجه این فرآیند، پیش‌بینی به سه بخش تقسیم می‌شود. بخش اول تعیین ویژگی‌های تاثیرگذار بر روی مقاومت‌های در نظر گرفته شده بتن مسلح شده با الیاف فولادی را ارائه می‌دهد. در مرحله دوم، فرمول‌های به دست آمده توسط رگرسیون نمادی ارائه شده است. ثالثاً، تحلیل خطا در رابطه با فرمولاسیون معرفی شده با سوابق تحقیقات قبلی به صورت آزمایشگاهی بررسی خواهد شد. در شکل (۳) به صورت نمونه نحوه عملکرد این مدل نشان داده شده است.



شکل (۳): فرآیند تولید معادله توسط مدل رگرسیون نمادی

¹ Symbolic Regression

Figure (3): Equation generation process using the symbolic regression model

همانطور که قبلاً بیان گردید در فاز سوم پژوهش مدل ریاضی تعیین مقاومت‌های SFRC با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین بدست آمد. برای این منظور از مدل توسعه یافته رگرسیون نمادی که خروجی آن به صورت روابط ریاضی است، استفاده شده است. طبق نتایج خروجی حاصل از مدل یادگیری ماشین رگرسیون نمادی، رابطه پیش بینی مقاومت فشاری برای انواع الیاف صاف، موجدار، و دوسرقلاب به ترتیب در روابط (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) بیان شده است [۲۵]:

$$F_1(X_2, X_3, \alpha_1, \alpha_2) = X_0 X_2 X_3 \left(-\alpha_1 \log(\log(X_2)) + \frac{\alpha_1}{\cos\left(\sin\left(\frac{X_4}{\log(X_2 X_3)}\right)\right)} - \frac{1}{\alpha_2 - X_3} \right) - \dots$$

$$\dots - \alpha_1 \log(-X_3) + \log(X_2 X_3) + \log\left(X_2 X_3 \left(\frac{-1}{\alpha_2 - X_3} + \frac{X_4}{X_0}\right)\right) + \dots \quad (17)$$

$$\dots + \log\left(X_2 X_3 \left(X_2 X_3 \log(X_2 X_3) - \frac{1}{\alpha_2 - X_3}\right) \left(\frac{1}{\cos X_2} - \frac{1}{\alpha_2 - X_3}\right)\right) + \dots$$

$$\dots + \log\left(\alpha_2 \log(\cos(X_3 - \alpha_2))\right) + \frac{\alpha_1}{\cos(X_2)} - \frac{1}{X_3} + \frac{X_4}{X_0},$$

$$F_2(X_0, X_1, X_3, X_4, X_5, X_6, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) = \log\left(\cos\left(\alpha_3 X_0 - \frac{\cos(\alpha_3 X_0) + \cos(X_1)}{X_1 + X_5 X_6 + \sin(X_1) - \alpha_4}\right) + \alpha_5\right) - \dots$$

$$\dots - 1 / \left(-\frac{X_1}{X_0 X_6 + 0.397} - (X_1 - \alpha_4)(X_1 - X_3 + 2(X_1 - \alpha_4)\cos(\log(X_6))) \right), \quad (18)$$

$$F_3(X_2, X_3, X_6, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9) = \left(\alpha_6 \log\left(\frac{0.089}{X_2}\right) - \alpha_7 - \frac{\alpha_6}{-\alpha_6 + \frac{1}{X_3} + \frac{0.089}{X_2}} \right) / \dots$$

$$\dots / \left(X_2 - \alpha_9 + i\pi - \frac{\log(X_2)^2}{X_2} \right) + 2\log(X_2) - \dots \quad (19)$$

$$\dots - \alpha_6 \log\left(\cos\left(\frac{1}{\cos(X_6 - 0.241)} - \frac{1}{-X_2 - 0.089 + \frac{1}{X_3}}\right)\right) + \frac{\alpha_6}{\cos(X_2)},$$

که در آن X_0 حداکثر اندازه سنگدانه بر حسب میلی متر، X_1 مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال، X_2 مقاومت بتن شاهد بر حسب مگاپاسکال، X_3 نسبت آب به سیمان، X_4 درصد حجمی الیاف، X_5 طول الیاف، X_6 نسبت ابعادی الیاف، و X_7 مقاومت کششی یا خمشی بتن شاهد بر اساس نوع خروجی مورد بررسی است. ثوابت در فرمول‌های فوق الذکر عبارتند از:

$$\alpha_1 = 39.497890205207, \alpha_2 = 0.166, \alpha_3 = 5.43478260869565, \alpha_4 = 0.028399474521698, \\ \alpha_5 = 0.999596762026504, \alpha_6 = 39.497890205207, \alpha_7 = 144.229010561867, \\ \alpha_8 = 1.02564102564103, \alpha_9 = 3.67624725795418$$

به طور مشابه، روابط مقاومت کششی، برای الیاف صاف، موجدار، و دوسرقلاب به ترتیب در روابط (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است [۲۵]:

$$F_4(X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = \frac{X_4}{X_5} - \log(0.044X_3) + \frac{X_1 + X_2 + X_4}{X_0}, \quad (20)$$

$$F_5(X_6) = X_6 + 3.53356890459364, \quad (21)$$

$$F_6(X_3, X_4, X_7) = \frac{X_4}{X_7} + 7.57575757 + \frac{1}{X_3 + 0.0132}, \quad (22)$$

و برای مقاومت خمشی، رابطه‌های متناظر برای الیاف صاف، موجدار، و دوسرقلاب نیز به ترتیب در روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) بیان شده است [۲۵]:

$$F_7(X_0, X_2, X_3, X_4, X_5, X_7, \alpha_{10}) = \frac{-X_0}{X_3 X_7 \log(X_4)} + X_4 X_5^3 X_7 + \left(\alpha_{10} X_4 + \sin\left(\frac{1}{X_5(X_0 - X_7)}\right) \right) \times \\ \dots \times \log \left(\frac{\frac{0.147}{-X_7 + \cos(X_0 - X_5)} + \frac{\sin(X_5)}{X_0 - X_2}}{X_4 X_5^2 X_7 (X_0 - X_2)} + \frac{1}{\sin(X_5)} \right), \quad (23)$$

$$F_8(X_0, X_3, X_4, X_7) = X_0 + \log(X_0) - \log(X_6 - 0.426) + \frac{X_4}{X_3} + \frac{1}{X_3} + \dots \\ \dots + \frac{X_4 + X_7}{X_0^2 \left(\log\left(0.426 + \frac{1}{X_3}\right) + \frac{0.592}{X_0} \right)} \quad (24)$$

$$F_8(X_3, X_4, X_6, X_7) = X_7 \left(\frac{2X_4}{X_6} + 28.5714285714286 X_7 - \frac{1}{X_3} \right) + 3.003003003003 + \frac{1}{X_3} \quad (25)$$

که در آن $\alpha_{10} = 4.97512437810945$ می باشد.

۳- بررسی آزمایشگاهی

۱-۳- مصالح

۱-۱-۳- سیمان

در انجام این پروژه از سیمان پرتلند نوع ۳۲۵-۱ کارخانه دلجان که مطابق با ضوابط استاندارد ASTM C150 [۲۷] می‌باشد، استفاده شده است. از آن‌جا که کیفیت سیمان بر کیفیت بتن تولیدی تأثیر به‌سزایی دارد، لذا تولید سیمان نیاز به دقت زیاد در کنترل دارد و آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه‌های کارخانجات سیمان انجام می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که سیمان دارای کیفیت مورد نظر بوده و با الزامات استانداردهای مربوطه سازگار می‌باشد. در این تحقیق هیچ‌گونه آزمایشی بر روی سیمان صورت نگرفته است و به آزمایش‌هایی که کارخانه سازنده به آن دست یافته است، استناد شده است. در جدول (۲) مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی بیان شده است.

جدول (۲): مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مورد استفاده

Table (2): Chemical and physical properties of the cement used

واحد / توضیحات	مقدار / محدودیت	پارامتر	نوع مشخصه
MPa	$10 \leq$	مقاومت فشاری ۲ روزه	مشخصات
MPa	$42/5 - 62/5$	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مکانیکی
Cm ² /gr	۲۸۰۰-۳۲۰۰	ریزی (نرمی بلین)	
درصد وزنی	$\leq 2.0\%$	(دی‌اکسید سیلیکون) SiO ₂	
درصد وزنی	۶۵-۶۰٪	(اکسید کلسیم) CaO	
درصد وزنی	$\geq 6\%$	(اکسید آلومینیوم) Al ₂ O ₃	
درصد وزنی	$\geq 6\%$	(اکسید آهن) Fe ₂ O ₃	مشخصات
درصد وزنی	$\geq 5\%$	(اکسید منیزیم) MgO	شیمیایی
$A_{C_3A} \leq 8\%$	$\geq 3\%$	(تری‌اکسید گوگرد) SO ₃	
درصد وزنی	$\geq 3\%$	افت حرارتی (L.O.I)	
درصد وزنی	$\geq 75.0\%$	باقی‌مانده نامحلول	

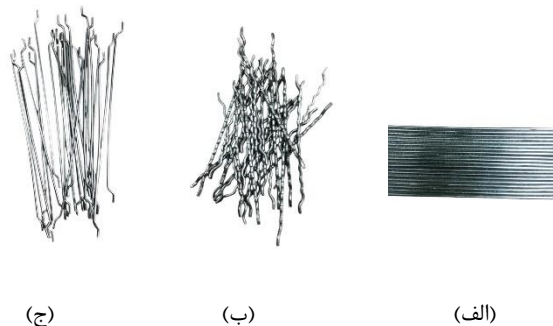
۲-۱-۳- آب

آب مورد استفاده در بتن باید زلال و عاری از مواد معلق باشد. در بسیاری از منابع، آب شرب را به عنوان گزینه مناسب برای تولید بتن معرفی کرده‌اند. در این آزمایش از آب لوله‌کشی به منظور تولید بتن استفاده گردیده که الزامات ASTM 1602 [۲۸] برآورد کرده است.

۳-۱-۳- الیاف

اصلی‌ترین جزء سازنده بتن الیافی، الیاف است. وجه تمایز، برتری و بهبود کیفیت بتن ارتباط مستقیمی با نوع الیاف انتخاب شده دارد. در این پژوهش برای بررسی تفاوت رفتار مکانیکی بتن الیافی با استفاده از الیاف مختلف با درصدهای حجمی متفاوت از سه نوع الیاف فولادی صاف یا مستقیم، موجدار و دوسرقلاب استفاده شد. الیاف مورد استفاده در این تحقیق محصول شرکت فراتاو^۱ بوده که طبق استاندارد ASTM A820 [۲۹] تولید و اشکال آنها در شکل (۴) نشان داده شده است.

¹ Faratav



شکل (۴): شکل الیاف فولادی مورد استفاده: (الف) صاف - (ب) موجدار - (ج) دوسرقلاب

Figure (4): Shape of the steel fibers used: (a) straight - (b) crimped - (c) hooked-end

همچنین لازم به ذکر است کلیه الیاف مورد استفاده در این تحقیق در ابعاد ماکرو می باشد. طبق اعلام شرکت تولید کننده مشخصات الیاف در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مشخصات الیاف مورد استفاده

Table (3): Specifications of the fibers used

الیاف فولادی موجدار	الیاف فولادی دوسرقلاب	الیاف فولادی صاف	مشخصات
۳۵	۳۵	۳۵	طول (mm)
۰/۴	۰/۴	۰/۴	قطر (mm)
۸۷/۵	۸۷/۵	۸۷/۵	نسبت طول به قطر
۲۸۳۰	۲۸۳۰	۲۸۳۰	مقاومت کششی (MPa)
۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)

۴-۱-۳- سنگدانه

مشخصات سنگدانه مصرفی در این تحقیق در جدول (۴) مشخص شده است. در این جدول، ویژگی‌های فیزیکی نمونه مورد آزمایش شامل چگالی دانه درشت، چگالی دانه ریز، درصد جذب آب دانه ریز و مدول نرمی آورده شده است. چگالی دانه‌های درشت و ریز بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب با استفاده از روش استاندارد ASTM C29 تعیین شده‌اند که در آن جرم مصالح خشک در حجم معینی از ظرف اندازه‌گیری می‌شود و چگالی حجمی به دست می‌آید. درصد جذب آب برای هر دو گروه دانه‌ها (درشت و ریز) نیز به روش ASTM C128 و ASTM C127 به ترتیب برای دانه‌های ریز و درشت محاسبه شده است، که شامل غوطه‌ور کردن نمونه خشک در آب به مدت ۲۴ ساعت و سپس محاسبه درصد افزایش وزن است. مدول نرمی نیز با استفاده از روش ASTM C136 تعیین شده و نشان‌دهنده توزیع دانه‌بندی مصالح ریز است که از طریق جمع مقادیر تجمعی باقیمانده بر روی الک‌های استاندارد به دست می‌آید [۳۰-۳۲]. این ویژگی‌ها نقش کلیدی در طراحی مخلوط‌های بتن و خواص مهندسی نهایی آن دارند.

جدول (۴): مشخصات سنگدانه های درشت دانه و ریزدانه

Table (4): Specifications of coarse and fine aggregates

ویژگی	چگالی درشت دانه (Kg/m^3)	چگالی ریز دانه (Kg/m^3)	درصد جذب آب درشت دانه	درصد جذب آب ریزدانه	مدول نرمی
-------	-------------------------------------	------------------------------------	-----------------------	---------------------	-----------

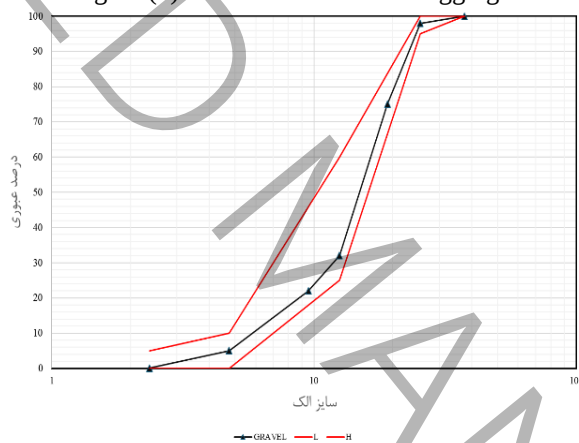
مقدار	۱۴۶۶	۱۵۰۳	%۰/۸	%۱/۳	%۲/۹۶
-------	------	------	------	------	-------

مطابق با آئین‌نامه ACI544.1R [۳۳] بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه درشت‌دانه نیز ۱۹ میلیمتر می‌باشد (شکل (۵)). همچنین منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده در این تحقیق نیز در شکل (۶) آورده شده است.

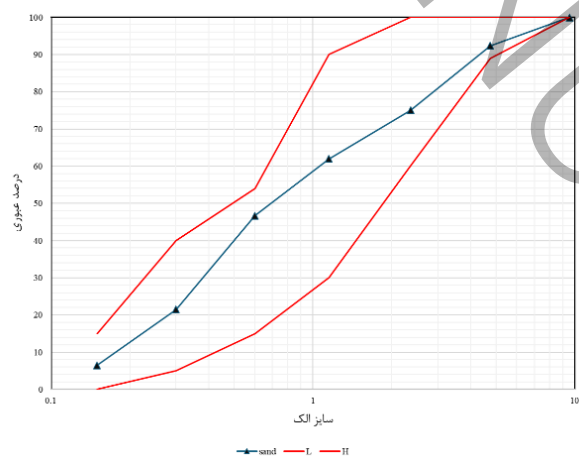


شکل (۵): اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه مورد استفاده

Figure (5): Maximum size of the aggregate used



(الف) درشت دانه



(ب) ریزدانه

شکل (۶): منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده (الف) ریزدانه – (ب) درشت دانه

Figure (6): Aggregate gradation curve of the used aggregates: (a) fine aggregate – (b) coarse aggregate

۵-۱-۳- ماده افزودنی

هر قدر آب مصرفی در بتن بیشتر باشد بتن تازه کارایی بیشتری دارد ولی در مقابل مقاومت بتن سخت شده پایین تر است. بنابراین برای جلوگیری از کاهش مقاومت بتن ناشی از وجود الیاف، استفاده از فوق روان کننده در بتن های الیافی ضروری است.

در این پروژه از فوق روان کننده شرکت رامکا با نام تجاری کوانتیوم^۱ استفاده می شود. این محصول طبق اعلام شرکت سازنده مطابق با ضوابط ASTM C1017 [۳۴] است.

۲-۳- ساخت نمونه

۱-۲-۳- مشخصات نمونه ها

در این تحقیق در مجموع ۹۰ نمونه بتن ساخته شده است که با توجه به نوع آزمایش ها، ابعاد و تعداد نمونه های مکعبی، استوانه ای و تیر لازم جهت انجام آزمایش ها بر روی بتن مسلح به الیاف فولادی مطابق جدول (۵) است.

جدول (۵): مشخصات نمونه ها

Table (5): Specifications of the specimens

نوع	طول	عرض	ارتفاع	قطر	کاربرد	تعداد نمونه	حجم کل نمونه ها (Cm^3)
نمونه مکعبی	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	-	مقاومت فشاری	۳۰	۱۰۱۲۵
نمونه استوانه ای	-	-	۲۰۰	۱۵۰	مقاومت کششی	۳۰	۴۷۱۲
تیر بتنی	۴۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	مقاومت خمشی	۳۰	۱۲۰۰۰

۲-۲-۲- طرح اختلاط

بر اساس نتایج تحقیقات گذشته و با توجه به الیاف مورد استفاده در این تحقیق، مطابق با جدول (۶) ده طرح جهت اختلاط نمونه های بتن مسلح به الیاف فولادی مختلف در نظر گرفته شده است. در این جدول نام گذاری هر طرح بر اساس نوع الیاف (I الیاف مستقیم، II الیاف دوسرقلاب، III الیاف موجدار) و درصد استفاده از الیاف (۵/۰ درصد با پسوند ۱، ۱۰/۰ درصد با پسوند ۲ و ۱۵/۰ درصد با پسوند ۳) انجام گرفته است.

جدول (۶): مشخصات طرح اختلاط نمونه ها

Table (6): Mix design specifications of the specimens

کد طرح	الیاف (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)
Base	۰	۰/۰۴۷	۵/۴	۱۳/۵	۲۱/۷	۳۲/۶
Fib-I-1	۳/۰۰۲	۰/۰۴۷	۵/۴	۱۳/۵	۲۱/۷	۳۲/۶
Fib-I-2	۲/۰۰۱	۰/۰۴۷	۵/۴	۱۳/۵	۲۱/۷	۳۲/۶
Fib-I-3	۱/۰۰۱	۰/۰۴۷	۵/۴	۱۳/۵	۲۱/۷	۳۲/۶
Fib-II-1	۳/۰۰۲	۰/۰۴۷	۵/۴	۱۳/۵	۲۱/۷	۳۲/۶
Fib-II-2	۲/۰۰۱	۰/۰۴۷	۵/۴	۱۳/۵	۲۱/۷	۳۲/۶

¹ QUANTUM

۳۲/۶	۲۱/۷	۱۳/۵	۵/۴	۰/۰۴۷	۱/۰۰۱	Fib-II-3
۳۲/۶	۲۱/۷	۱۳/۵	۵/۴	۰/۰۴۷	۳/۰۰۲	Fib-III-1
۳۲/۶	۲۱/۷	۱۳/۵	۵/۴	۰/۰۴۷	۲/۰۰۱	Fib-III-2
۳۲/۶	۲۱/۷	۱۳/۵	۵/۴	۰/۰۴۷	۱/۰۰۱	Fib-III-3

در ادامه و در جدول (۷) نتیجه تست ویبی مربوط به نمونه‌های هر طرح مخلوط بتن مسلح به الیاف فولادی مورد آزمایش نشان داده شده است. لازم به ذکر است از سه نوع الیاف مورد استفاده، بتن با الیاف موجدار در درصدهای ۱ و ۱/۵ به سختی و با روش ترکیب میله زدن و ویریه متراکم گردید.

جدول (۷): نتایج بررسی وزن مخصوص و کارایی نمونه‌ها

Table (7): Results of density and workability evaluation of the specimens

نتیجه تست ویبی	عیار سیمان	وزن مخصوص بتن سخت شده	وزن مخصوص بتن تازه	نام گذاری طرح مخلوط	کد طرح
(cm) / sec.	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	نام طرح	
۶	۴۵۱	۲۴۳۷	۲۴۴۸	شاهد	۱
۱۶	۴۵۴	۲۵۰۹	۲۴۹۶	fib - I - 1	۲
۳۰	۴۵۰	۲۵۱۳	۲۵۰۶	fib - I - 2	۳
۷۵	۴۵۴	۲۵۴۹	۲۵۶۱	fib - I - 3	۴
۱۰	۴۵۸	۲۵۱۴	۲۴۸۸	fib - II - 1	۵
۳۰	۴۰۵	۲۵۲۳	۲۵۰۵	fib - II - 2	۶
۵۰	۴۰۸	۲۵۴۵	۲۵۲۱	fib - II - 3	۷
۳۵	۴۲۱	۲۴۲۷	۲۴۲۴	fib - III - 1	۸
>۱۲۰	۴۲۰	۲۴۴۴	۲۴۱۷	fib - III - 2	۹
>۱۲۰	۴۱۳	۲۴۹۶	۲۴۹۱	fib - III - 3	۱۰

۳-۳- نتایج آزمایش

در جداول (۸) تا (۱۰) به ترتیب نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بیان شده است. در این جداول مشخصات نمونه‌ها بر اساس نوع نمونه و شماره طرح مخلوط بتن و شماره نمونه نشان داده شده است. در این جداول به ترتیب (CU - Cy - BM) بیانگر نوع نمونه (مکعبی - استوانه‌ای - تیر) خواهد بود و سپس شماره کد طرح آورده شده و در انتها نیز شماره نمونه بیان شده است. در شکل (۷) تصاویر مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است.



ب - نمونه پس از انجام آزمایش

الف - نمونه قبل از شروع آزمایش

شکل (۷): تصویر آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها (الف) قبل از شروع آزمایش - (ب) پس از انجام آزمایش

Figure (7): Image of the compressive strength test of the specimens: (a) before the test - (b) after the test

آزمایش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی انواع الیاف فولادی در درصدهای مختلف، با هدف بررسی عملکرد مکانیکی این ترکیبات نسبت به نمونه شاهد (فاقد الیاف)، انجام شد. داده‌های جدول (۸) نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن باعث افزایش محسوس در مقاومت فشاری می‌گردد، به‌ویژه در مقایسه با بتن معمولی.

جدول (۸): نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش شده

Table (8): Compressive strength results of the tested specimens

مشخصات نمونه	نوع الیاف	درصد الیاف	مقاومت نمونه‌ها (MPa)	مقاومت میانگین (MPa)
CU-01-1	بدون الیاف	۰	۵۱	۴۸/۲۵
CU-01-2			۴۸/۶	
CU-01-3			۴۵/۲	
CU-02-1			۴۹/۷	
CU-02-2			۴۸/۴	
CU-02-3			۵۰/۷	
CU-03-1	صاف	۱	۵۷/۴	۵۶/۵۰
CU-03-2			۵۹	
CU-03-3			۵۳/۱	
CU-04-1			۶۲/۹	
CU-04-2			۵۹/۵	
CU-04-3			۵۸/۷	
CU-05-1	دوسرقلاب	۱	۶۴/۶	۶۶/۰۴
CU-05-2			۶۳/۳	
CU-05-3			۷۰/۳	
CU-06-1			۶۸/۵	
CU-06-2			۶۳/۹	
CU-06-3			۷۰	
CU-07-1		۱/۵	۷۰/۷	۷۰/۷۳
CU-07-2			۷۱/۶	
CU-07-3			۶۹/۹	

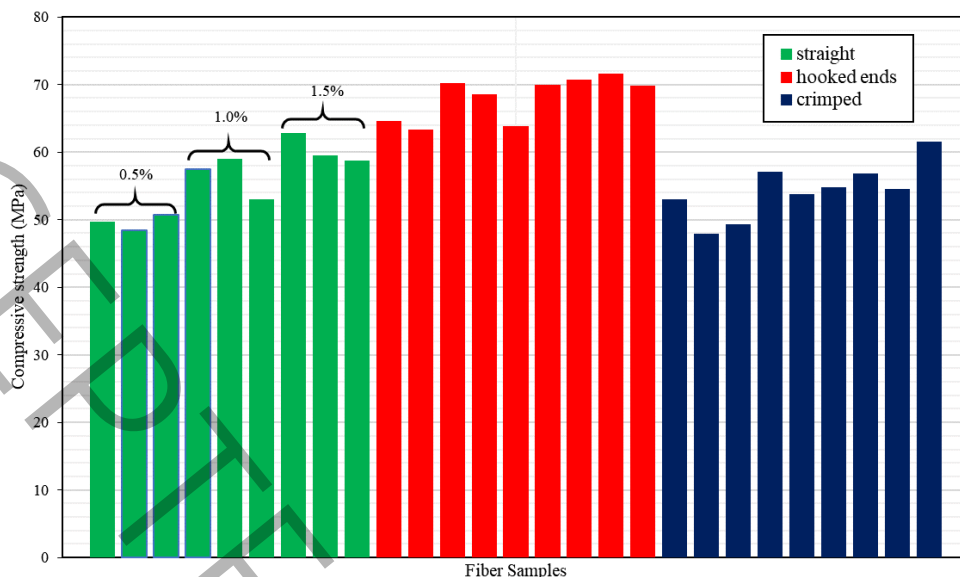
CU-08-1			۵۳	
CU-08-2		۰/۵	۴۷/۹	۵۰/۰۸
CU-08-3			۴۹/۳	
CU-09-1			۵۷/۲	
CU-09-2	موجدار	۱	۵۳/۸	۵۵/۲۵
CU-09-3			۵۴/۸	
CU-10-1			۵۶/۹	
CU-10-2		۱/۵	۵۴/۵	۵۷/۶۶
CU-10-3			۶۱/۶	

نمونه شاهد دارای میانگین مقاومت فشاری ۴۸/۲۵ مگاپاسکال بود. این مقدار کمترین مقدار در میان کل نمونه‌ها محسوب می‌شود، که نقش محدود ساختار زمینه بتن در تحمل بار فشاری را به تنهایی نمایان می‌سازد. در مقابل، نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی صاف بیانگر افزایش پیوسته مقاومت با افزایش درصد الیاف بود، به گونه‌ای که از ۴۹/۵۹ مگاپاسکال در ۰/۵ درصد به ۶۰/۳۶ مگاپاسکال در ۱/۵ درصد رسید. این افزایش را می‌توان ناشی از توزیع بهتر تنش و کاهش گسترش ریزترک‌ها به واسطه وجود الیاف دانست.

بیشترین اثرگذاری در افزایش مقاومت فشاری مربوط به الیاف فولادی دوسرقلاب بود. با افزایش درصد این نوع الیاف از ۰/۵ درصد به ۱/۵ درصد، مقاومت میانگین از ۶۶/۰۴ به ۷۰/۷۳ مگاپاسکال افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد بیش از ۴۶٪ نسبت به نمونه شاهد است. قلاب‌های انتهایی این نوع الیاف باعث گیرش مکانیکی مؤثر درون خمیر سیمان شده و نقش تقویتی چشمگیری به‌ویژه در برابر گسترش ترک‌های فشاری تحت بارگذاری محوری ایفا می‌کنند.

در خصوص الیاف فولادی موجدار نیز روند افزایشی در مقاومت فشاری مشاهده شد. هرچند این افزایش نسبت به دو نوع دیگر کمتر بود، اما در ۱/۵ درصد مقاومت میانگین نمونه‌ها به ۵۷/۶۶ مگاپاسکال رسید. ساختار موجدار الیاف با ایجاد اصطکاک درونی و درگیری فیزیکی مناسب، موجب بهبود رفتار مکانیکی بتن شد، اما به دلیل عدم قلاب‌گیری، اثربخشی آن نسبت به الیاف دوسرقلاب کمتر بود.

شکل (۸) نمودار نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی با انواع الیاف نشان داده شده است. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف فولادی، به‌ویژه در نوع دوسرقلاب و در درصدهای بالاتر (۱/۵ درصد)، نقش مؤثری در بهبود مقاومت فشاری بتن دارد. این بهبود ناشی از افزایش همگنی مخلوط، مهار مؤثرتر ریزترک‌ها، و افزایش انرژی جذب‌شده پیش از گسیختگی نهایی است.



شکل (۸): نمودار نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مسلح به الیاف فولادی با درصدهای مورد آزمایش

Figure (8): Diagram of compressive strength results of steel fiber-reinforced concrete specimens with the investigated volume fractions

شکل ۹ تصاویر آزمایش کشش را نشان می دهد.



ب - نمونه پس از انجام آزمایش



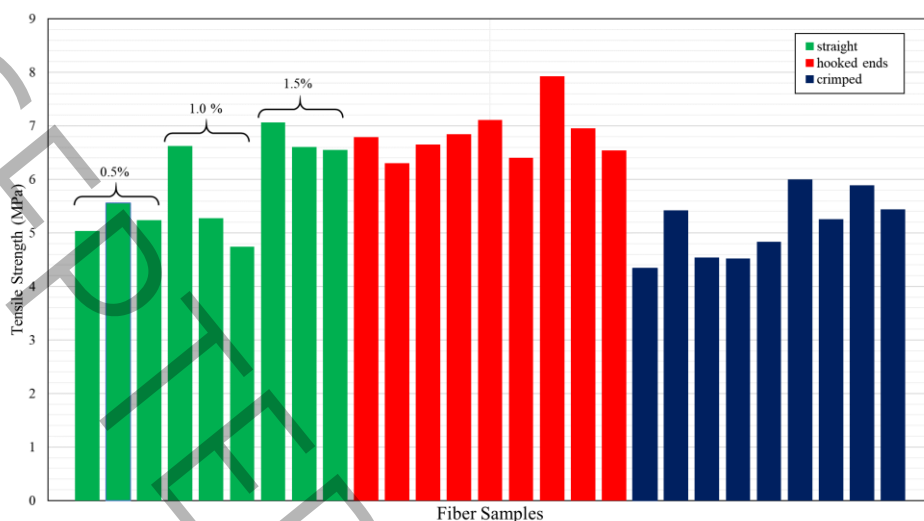
الف - نمونه قبل از شروع آزمایش

شکل (۹): تصویر آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها (الف) قبل از شروع آزمایش - (ب) پس از انجام آزمایش

Figure (9): Image of the tensile strength test of the specimens: (a) before the test - (b) after the test

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن تأثیر مثبتی بر افزایش مقاومت کششی دارد. نمونه شاهد بدون الیاف دارای میانگین مقاومت $4/81$ مگاپاسکال بود. با افزودن الیاف صاف، مقاومت کششی به $6/74$ مگاپاسکال در $1/5$ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش 40 درصدی نسبت به نمونه شاهد است. با این حال، بالاترین مقدار مقاومت کششی مربوط به الیاف فولادی دوسرقلاب در $1/5$ درصد بود که میانگین مقاومت آن به $7/14$ مگاپاسکال رسید. این افزایش به واسطه درگیری مکانیکی بهتر الیاف قلاب‌دار با ماتریس سیمانی و جلوگیری از گسترش ترک‌های کششی در نمونه‌ها قابل توجیه است. در مقابل، عملکرد الیاف موجدار به‌ویژه در درصدهای پایین چندان چشمگیر نبود و در برخی موارد مقاومت

کششی کمتر از نمونه بدون الیاف ثبت گردید که احتمالاً به دلیل توزیع نامناسب یا درگیری کمتر الیاف با زمینه بتن می‌باشد. مطابق با جدول با نتایج جدول ۹ نمودارهای شکل ۱۰ ترسیم شده است.



شکل (۱۰): نمودار نتایج مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی با درصدهای مورد آزمایش

Figure (10): Diagram of tensile strength results of steel fiber-reinforced concrete with the investigated volume fractions

جدول (۹): مقاومت کششی نمونه‌های آزمایش شده

Table (9): Tensile strength of the tested specimens

مشخصات نمونه	نوع الیاف	درصد الیاف	مقاومت نمونه‌ها (MPa)	مقاومت میانگین (MPa)
CY-01-1	بدون الیاف	۰	۴/۷	۴/۸۱
CY-01-2			۵	
CY-01-3			۴/۸	
CY-02-1	صاف	۰/۵	۵	۵/۲۸
CY-02-2			۵/۶	
CY-02-3			۵/۲	
CY-03-1	صاف	۱	۶/۶	۵/۵۵
CY-03-2			۵/۳	
CY-03-3			۴/۷	
CY-04-1	دوسرقلاب	۱/۵	۷/۱	۶/۷۴
CY-04-2			۶/۶	
CY-04-3			۶/۶	
CY-05-1	دوسرقلاب	۰/۵	۶/۸	۶/۵۸
CY-05-2			۶/۳	
CY-05-3			۶/۶	
CY-06-1	دوسرقلاب	۱	۶/۸	۶/۷۹
CY-06-2			۷/۱	
CY-06-3			۶/۴	
CY-07-1	دوسرقلاب	۱/۵	۷/۹	۷/۱۴
CY-07-2			۷	
CY-07-3			۶/۵	

CY-08-1			۴/۳	
CY-08-2		۰/۵	۵/۴	۴/۷۷
CY-08-3			۴/۵	
CY-09-1			۴/۵	
CY-09-2	موجدار	۱	۴/۸	۵/۱۲
CY-09-3			۶	
CY-10-1			۵/۳	
CY-10-2		۱/۵	۵/۹	۵/۵۳
CY-10-3			۵/۴	

شکل ۱۱ مربوط به آزمایش مقاومت خمشی است. در بررسی مقاومت خمشی نیز، روند مشابهی مشاهده شد. بتن یافدار در تمامی حالات عملکرد بهتری نسبت به نمونه فاقد الیاف نشان داد. نمونه شاهد دارای مقاومت میانگین ۹/۸۷ مگاپاسکال بود، در حالی که با استفاده از الیاف دوسرقلاب در ۱/۵ درصد، مقاومت به ۱۵/۲۴ مگاپاسکال افزایش یافت که بیانگر افزایشی در حدود ۵۴٪ نسبت به نمونه شاهد است. این موضوع نقش قلاب‌های انتهایی در بهبود چسبندگی و کاهش گسیختگی ناگهانی در شرایط بارگذاری خمشی را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین، الیاف صاف نیز توانستند مقاومت خمشی را تا حدود ۱۳ مگاپاسکال ارتقا دهند، ولی میزان این بهبود نسبت به الیاف قلابدار کمتر بود. در مورد الیاف موجدار، همانند نتایج کششی، اثرگذاری آن‌ها محدودتر بوده و در برخی موارد مانند ۰/۵ درصد، مقاومت خمشی کمتر از نمونه شاهد ثبت گردید.



ب - نمونه پس از انجام آزمایش

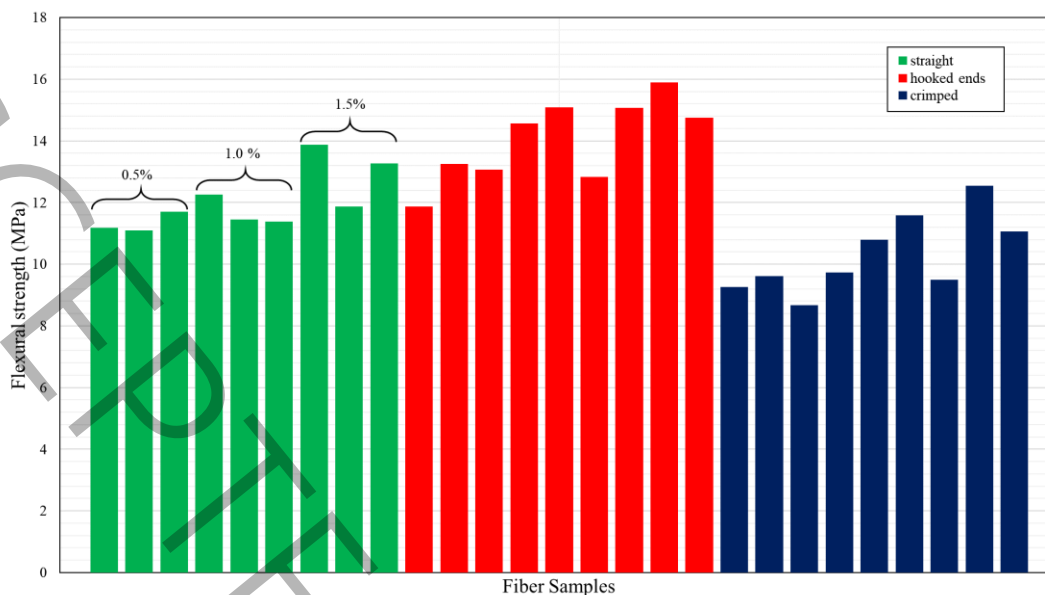


الف - نمونه قبل از شروع آزمایش

شکل (۱۱): تصویر آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها (الف) قبل از شروع آزمایش - (ب) پس از انجام آزمایش

Figure (11): Image of the flexural strength test of the specimens: (a) before the test - (b) after the test

همچنین بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۱۰ نمودارهای مقایسه‌ای شکل ۱۲ ترسیم شده است.



شکل (۱۲): نمودار نتایج مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی با درصدهای مورد آزمایش

Figure (12): Diagram of flexural strength results of steel fiber-reinforced concrete with the investigated volume fractions

جدول (۱۰): مقاومت خمشی نمونه‌های آزمایش شده

Table (10): Flexural strength of the tested specimens

مشخصات نمونه	نوع الیاف	درصد الیاف	مقاومت نمونه‌ها (MPa)	مقاومت میانگین (MPa)
BM-01-1	بدون الیاف	۰	۹	۹/۸۷
BM-01-2			۱۰/۲	
BM-01-3			۱۰/۴	
BM-02-1	۰/۵	۰/۵	۱۱/۲	۱۱/۳۲
BM-02-2			۱۱/۱	
BM-02-3			۱۱/۷	
BM-03-1	صاف	۱	۱۲/۳	۱۱/۷
BM-03-2			۱۱/۵	
BM-03-3			۱۱/۴	
BM-04-1	۱/۵	۱/۵	۱۳/۹	۱۳
BM-04-2			۱۱/۹	
BM-04-3			۱۳/۳	
BM-05-1	۰/۵	۰/۵	۱۱/۹	۱۲/۷۳
BM-05-2			۱۳/۳	
BM-05-3			۱۳/۱	
BM-06-1	دوسرقلاب	۱	۱۴/۶	۱۴/۱۶
BM-06-2			۱۵/۱	
BM-06-3			۱۲/۸	
BM-07-1	۱/۵	۱/۵	۱۵/۱	۱۵/۲۴
BM-07-2			۱۵/۹	
BM-07-3			۱۴/۷	

BM-08-1			۹/۳	
BM-08-2		۰/۵	۹/۶	۹/۱۸
BM-08-3			۸/۷	
BM-09-1			۹/۷	
BM-09-2	موجدار	۱	۱۰/۸	۱۰/۷
BM-09-3			۱۱/۶	
BM-10-1			۹/۵	
BM-10-2		۱/۵	۱۲/۶	۱۱/۰۴
BM-10-3			۱۱/۱	

به طور کلی همانطور که از نتایج مربوط به جداول فوق مشاهده می‌گردد، دو نکته حائز اهمیت وجود دارد:

- اثر شکل الیاف؛ به طور کلی نتایج مقاومت‌های بتن حاوی الیاف دوسرقلاب نسبت به دو الیاف صاف و موجدار و نتایج الیاف موجدار نسبت به الیاف صاف بهتر بوده و افزودن این الیاف منجر به افزایش نتایج مقاومت نمونه‌ها شده است.
- اثر درصد حجمی الیاف؛ مطابق با نتایج با افزایش درصد حجمی مقاومت کلیه نمونه‌ها همواره با افزایش روبرو شده است. لازم به ذکر است؛ افزودن بیش از ۱/۵ درصد حجمی الیاف علاوه بر افت کارایی بعضاً منجر به کاهش مقاومت نمونه‌ها خواهد شد.

۴- نتایج و بحث

در این بخش بر اساس بانک اطلاعاتی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی دقت روابط گذشته که توسط محققان در بخش مقدمه معرفی گردید با روابط ارائه شده در این تحقیق مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که پیش از این بیان شد، ویژگیهای مدنظر برای رابطه ریاضی ارائه شده در این تحقیق به ترتیب شامل (X_0) سایز بزرگترین سنگدانه (X_1) مدول الاستیسیته، (X_2) مقاومت فشاری بتن شاهد، (X_3) نسبت آب به سیمان، (X_4) درصد حجمی الیاف، (X_5) طول الیاف، (X_6) نسبت ابعادی الیاف و (X_7) مقاومت کششی یا خمشی مرتبط با نوع خروجی الیاف است.

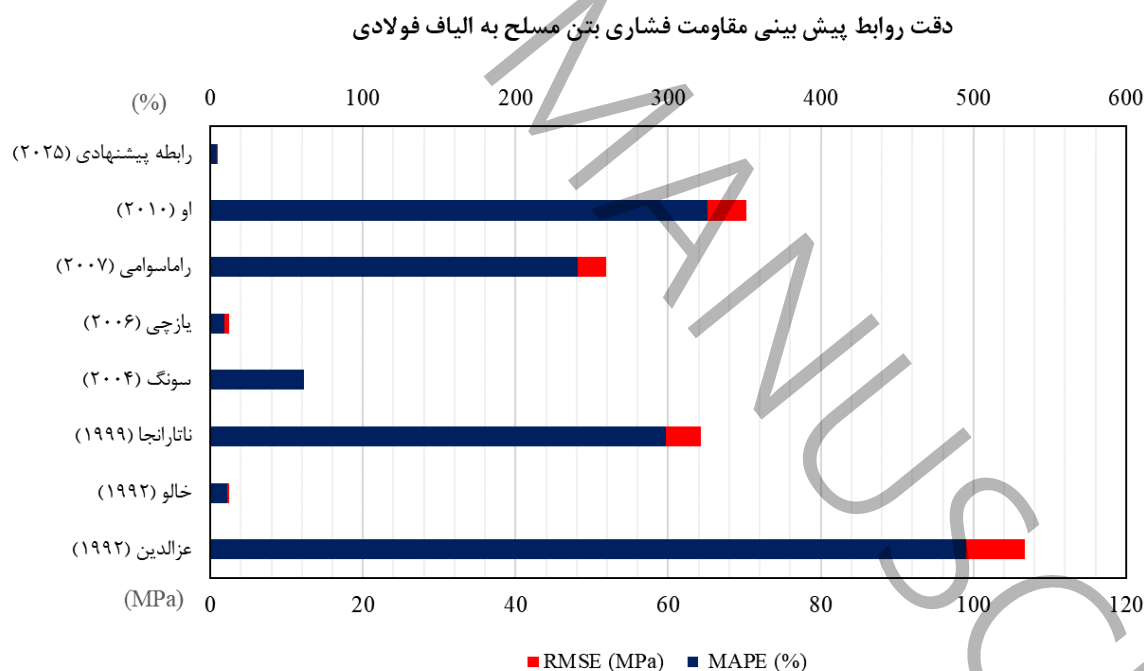
لازم به ذکر است؛ در بررسی روابط نتایج مورد ارزیابی ویژگی‌ها به صورت میانگین در رابطه وارد شده است. در جداول (۱۱) تا (۱۳) دقت روابط پیش‌بینی مقاومت فشاری، کشش و خمشی بررسی شده است. در این جداول چنانچه محقق یک ویژگی را مورد استفاده قرار داده باشد، علامت‌گذاری شده و نیز میزان خطا با معیارهای آماری (MAPE) که درصد مطلق خطا را نشان می‌دهد و (RMSE) که فاصله از مقدار واقعی را بر حسب مگاپاسکال بیان نموده، ذکر شده است. همچنین نمودارهای اشکال (۱۳) تا (۱۵) مربوط به نتایج جداول فوق الذکر است.

جدول (۱۱): صحت سنجی روابط پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن مسلح به الیاف فولادی

Table (11): Validation of predictive equations for compressive strength of steel fiber-reinforced concrete										
نام محقق	(X_0)	(X_1)	(X_2)	(X_3)	(X_4)	(X_5)	(X_6)	(X_7)	MAPE (%)	RMSE (MPa)
عزالدين و بالاگورو (۱۹۹۲) [۴]			✓		✓		✓		۴۹۵/۴۵	۱۰۶/۷۹
خالو و کیم (۱۹۹۶) [۲]			✓		✓				۱۱/۳۹	۲/۵۳

۶۴/۲۷	۲۹۸/۱۶	✓	✓	✓	ناتاراجا و همکاران (۱۹۹۹) [۵]
۱۱/۹۶	۶۱/۶			✓	سونگ و هوانگ (۲۰۰۴) [۳]
۲/۴۷	۹/۱۳	✓	✓		یازچی و همکاران (۲۰۰۶) [۶]
۵۱/۸۵	۲۴۰/۴۹	✓	✓	✓	توماس و راماسوامی (۲۰۰۷) [۷]
۷۰/۲۵	۳۲۵/۹۳	✓	✓	✓	او و همکاران (۲۰۱۲) [۸]
۰/۹۷۵۴	۴/۵۹	✓	✓	✓	رابطه پیشنهادی [۲۰]

با دقت در نمودار شکل (۱۳) و نتایج جدول (۱۱) می‌توان مشاهده کرد که روند نزولی خطا از روابط قدیمی‌تر به سمت مدل پیشنهادی بیانگر تکامل روش‌های تحلیلی از تجربی به داده‌محور^۱ است. همچنین مقدار بسیار پایین RMSE در مدل جدید نشان می‌دهد که الگوریتم یادگیری به‌خوبی توانسته الگوهای غیرخطی میان متغیرهای تأثیرگذار (نسبت آب به سیمان، درصد حجمی الیاف، مدول الاستیسیته و...) را درک و مدل‌سازی کند. این سطح از دقت پیش‌بینی در عمل می‌تواند باعث کاهش تعداد آزمایش‌های کارگاهی لازم برای کنترل کیفیت و افزایش دقت طراحی مخلوط‌های بتن الیافی گردد.



شکل (۱۳): نمودار نتایج خطای روابط مختلف برای پیش‌بینی مقاومت فشاری

Figure (13): Diagram of error results of different equations for predicting compressive strength

¹ Data-driven

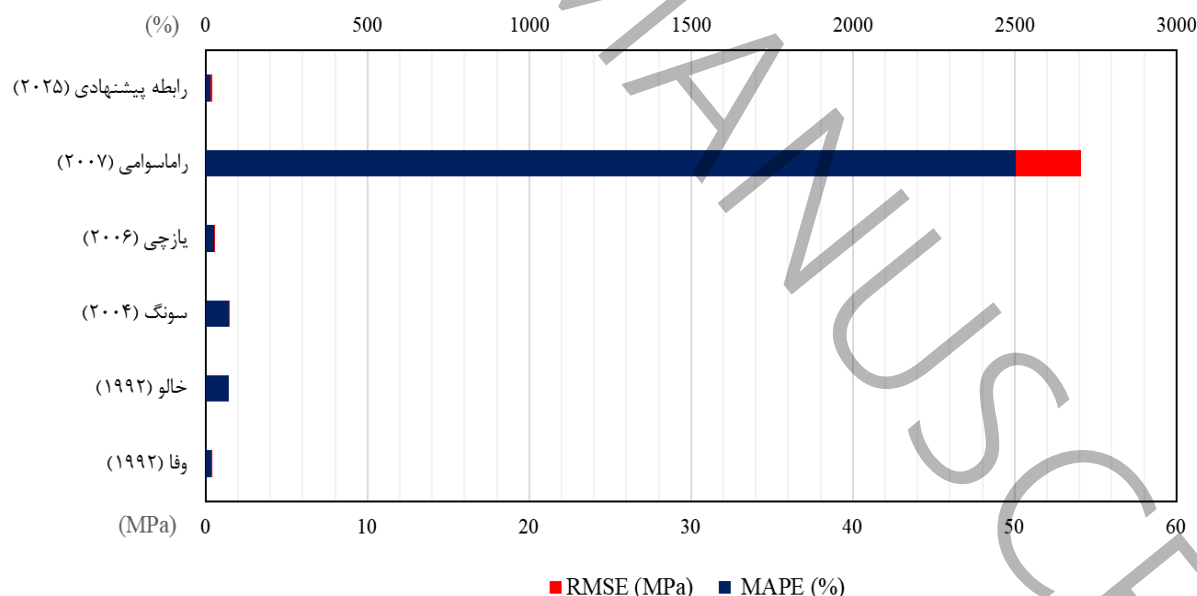
جدول (۱۲): صحت سنجی روابط پیش بینی مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی

Table (12): Validation of predictive equations for tensile strength of steel fiber-reinforced concrete

نام محقق	(X ₀)	(X ₁)	(X ₂)	(X ₃)	(X ₄)	(X ₅)	(X ₆)	(X ₇)	MAPE (%)	RMSE (MPa)
وفا و آشور (۱۹۹۲) [۳۵]					✓			✓	۱۷/۰۵	۰/۴۳
خالو و کیم (۱۹۹۶) [۲]					✓			✓	۷۰/۶۸	۱/۴۳
سونگ و هوانگ (۲۰۰۴) [۳]					✓				۷۳/۱۴	۱/۵۰
یازچی و همکاران (۲۰۰۶) [۶]					✓		✓		۲۶/۳۸	۰/۵۹
توماس و راماسوامی (۲۰۰۷) [۷]					✓		✓	✓	۲۵۰۳/۱۹	۵۴/۱۲
رابطه پیشنهادی [۲۰]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	۱۵/۶۶	۰/۴۰۸۳

بر اساس نتایج جدول (۱۲) و نمودارهای شکل (۱۴) به خوبی ملاحظه می‌گردد که مقاومت کششی بتن الیافی تابعی غیرخطی از درصد، نوع و توزیع الیاف است؛ از طرفی مدل‌های سنتی قادر به بازنمایی این روابط پیچیده نیستند. با این وجود مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از رویکرد یادگیری ماشین توانسته است اثرات هم‌زمان متغیرهای ترکیبی (مانند طول الیاف و نسبت آب به سیمان) را استخراج و الگوی دقیق‌تری ارائه کند. همچنین کاهش چشمگیر خطای MAPE نسبت به مدل‌های تجربی (از بیش از ۲۰۰۰٪ به کمتر از ۵٪) به‌روشنی نشان‌دهنده برتری روش‌های داده‌محور در تحلیل رفتار بتن‌های الیافی است.

دقت روابط پیش بینی مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی



شکل (۱۴): نمودار نتایج خطای روابط مختلف برای پیش بینی مقاومت کششی

Figure (14): Diagram of error results of different equations for predicting tensile strength

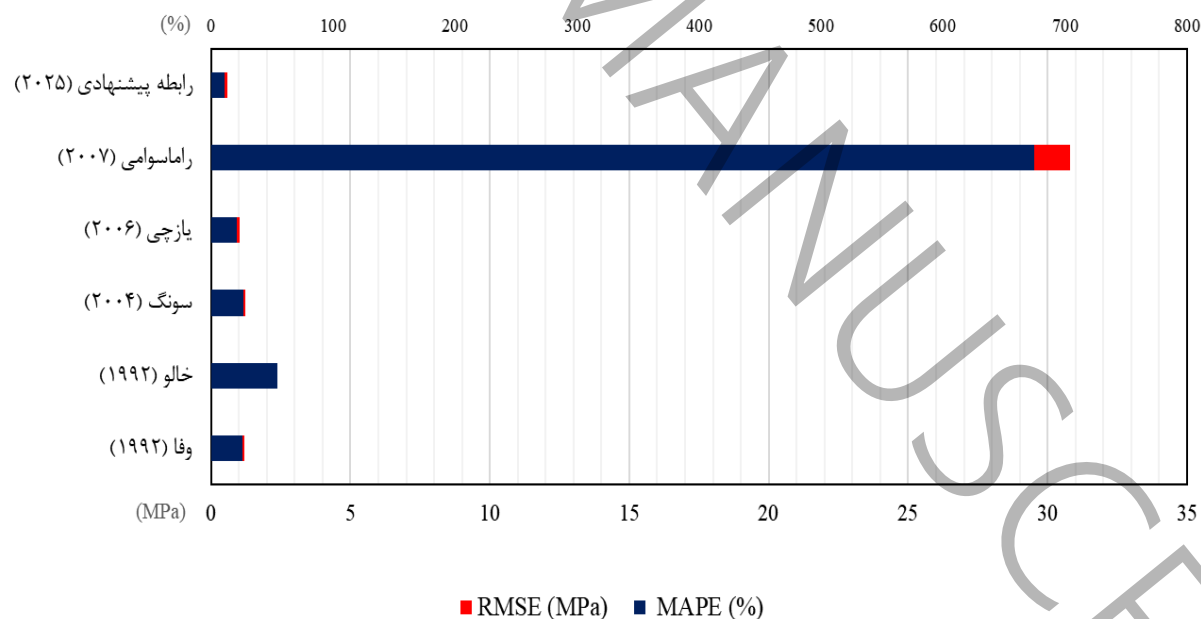
جدول (۱۳): صحت سنجی روابط پیش بینی مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی

Table (13): Validation of predictive equations for flexural strength of steel fiber-reinforced concrete

نام محقق	(X0)	(X1)	(X2)	(X3)	(X4)	(X5)	(X6)	(X7)	MAPE (%)	RMSE (MPa)
وفا و آشور (۱۹۹۲) [۳۵]	✓	✓			✓				۲۵/۵۱	۱/۱۹
خالو و کیم (۱۹۹۶) [۲]	✓	✓			✓				۵۴/۰۶	۲/۲۹
سونگ و هوانگ (۲۰۰۴) [۳]					✓				۲۶/۶۵	۱/۲۳
یازچی و همکاران (۲۰۰۶) [۶]				✓	✓		✓		۲۱/۲۴	۱/۰۴
توماس و راماسوامی (۲۰۰۷) [۷]				✓	✓	✓		✓	۶۷۴/۸۹	۳۰/۸۲
رابطه پیشنهادی [۲۰]	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	۱۱/۳۳	۰/۵۷۴۷

از نتایج جدول (۱۳) و نمودارهای شکل (۱۵) مشخص است که رفتار خمشی بتن‌های الیافی به شدت تحت تأثیر چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی و مکانیزم انتقال تنش پس از ترک‌خوردگی است؛ پدیده‌ای که ماهیت کاملاً غیرخطی و چندمتغیره دارد. نتایج نشان می‌دهد که روابط کلاسیک قادر به مدل‌سازی این رفتار پیچیده نیستند، در حالی که مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تطبیقی توانسته وابستگی متقابل پارامترها (مانند طول و نسبت ابعادی الیاف در کنار مقاومت فشاری پایه) را به‌درستی بازنمایی کند. کاهش چشمگیر خطا نسبت به مدل‌های گذشته (بیش از ۹۵٪ بهبود در MAPE) بیانگر آن است که رویکرد داده‌محور می‌تواند جایگزین مؤثری برای روابط تجربی ثابت در طراحی بتن‌های الیافی باشد.

دقت روابط پیش‌بینی مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی



شکل (۱۵): نمودار نتایج خطای روابط مختلف برای پیش‌بینی مقاومت خمشی

Figure (15): Diagram of error results of different equations for predicting flexural strength

۵- نتیجه گیری:

در این مقاله با استفاده از روش یادگیری ماشین روابط پیش‌بینی مقاومت‌های مکانیکی نمونه‌های بتن مسلح به الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت رابطه بهینه ارائه شد. لازم به ذکر است که مدل پیشنهادی برای الیاف با اشکال صاف، موجدار و دوسرقلاب و نیز در محدوده ماکرو دقت بالایی دارد؛ اما بررسی دقت مدل برای داده‌های خارج از محدوده آموزش و یا در شرایط مرزی مانند دماهای بالا یا بارگذاری‌های خاص صورت نگرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده، موارد ذیل قابل ذکر است:

- روابط مختلف در پیش‌بینی مقاومت فشاری بهتر از مقاومت کششی و خمشی عملکرد داشتند.
- تنها روابط ارائه شده در این تحقیق اثر شکل الیاف را در نظر گرفته و در سایر روابط محققان شکل الیاف تاثیری بر روی نتیجه پیش‌بینی مقاومت‌ها لحاظ نشده است.
- رابطه پیشنهادی تمام ویژگیهای مشخص شده را در پیش‌بینی مقاومت فشاری لحاظ نموده است ولی دو رابطه موفق دیگر تنها ویژگی مقاومت فشاری بتن شاهد، درصد حجمی الیاف و نسبت ابعادی الیاف را در نظر گرفته بودند.
- طبق رابطه پیشنهادی ویژگی مقاومت کششی نمونه شاهد اثری بر روی مقاومت نمونه بتن الیافی ندارد. با این حال طبق رابطه وفا و آشور این ویژگی در پیش‌بینی موثر بوده است. همچنین علاوه بر رابطه پیشنهادی دو رابطه موفق دیگر، ویژگی درصد حجمی الیاف در پیش‌بینی مقاومت کششی بتن الیافی موثر دانسته‌اند.
- طبق رابطه پیشنهادی برای مقاومت خمشی ویژگی مدول الاستیسیته اثری بر روی پیش‌بینی مقاومت خمشی نداشته است. همچنین هر سه رابطه موفق ویژگی درصد حجمی الیاف را موثر دانسته‌اند با این تفاوت که وفا و آشور در کنار درصد حجمی الیاف ویژگی موثر دیگر را مقاومت فشاری اعلام نموده و یازچی و همکاران ویژگی نسبت ابعادی را عامل موثر در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن الیافی معرفی کرده است.
- در پیش‌بینی مقاومت فشاری به ترتیب رابطه پیشنهادی با درصد خطای ۴/۵۹ و روابط ارائه شده توسط یازچی و همکاران با درصد خطای ۹/۱۳ و خالو و همکاران با درصد خطای ۱۱/۳۹ بهترین نتیجه را داشته است.
- در پیش‌بینی مقاومت کششی به ترتیب رابطه پیشنهادی با درصد خطای ۱۵/۶۶ و روابط ارائه شده توسط وفا و آشور با درصد خطای ۱۷/۰۵ و رابطه یازچی و همکاران با درصد خطای ۲۶/۳۸ بهترین نتیجه را داشته است.
- در پیش‌بینی مقاومت خمشی به ترتیب رابطه پیشنهادی با درصد خطای ۱۱/۳۳ و روابط ارائه شده توسط یازچی و همکاران با درصد خطای ۲۱/۴۴ و رابطه وفا و آشور با درصد خطای ۲۵/۵۱ بهترین نتیجه را داشته است.

مراجع:

- [1] D. Mostofi Nejad, Technology and Mix Design of Concrete, Arkan Publications, 44th ed., 2016. (In Persian)
- [2] A. Khaloo, N. Kim, Mechanical Properties of Normal to High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete, ACI Cement, Concrete, and Aggregate, 18(2) (1996) 92–97.
- [3] P.S. Song, S. Hwang, Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, Construction and Building Materials, 18 (2004) 669–673.
- [4] A.S. Ezeldin, P.N. Balaguru, Normal and high-strength fiber-reinforced concrete under compression, Journal of Materials in Civil Engineering, 4(4) (1992) 415–429.
- [5] M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta, Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete in compression, Cement and Concrete Composites, 21(5–6) (1999) 383–390.
- [6] S. Yazıcı, G. Inan, V. Tabak, Effect of aspect ratio and steel fiber volume fraction on the mechanical

properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21(6) (2007) 1250–1253.

[7] J. Thomas, A. Ramaswamy, Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(5) (2007) 385–392.

[8] Y. Ou, M. Tsai, K. Liu, K. Chang, Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2) (2012) 207–215.

[9] H. Salehi, R. Burgueño, Emerging artificial intelligence methods in structural engineering, *Engineering Structures*, 171 (2018) 170–189.

[10] M. Açikgenc, M. Ulaş, K.E. Alyamaç, Using an artificial neural network to predict mix compositions of steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, (2014).

[11] M. Moradi, A.R. Bagherieh, M.R. Esfahani, Relationship of Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Based on Genetic Programming, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 6(3) (2016) 349–363.

[12] S. Lu et al., A Novel Feature Selection Approach Based on Tree Models for Evaluating the Punching Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Flat Slabs, *Materials*, 13 (2020) 3902.

[13] H.B. Ly et al., Computational hybrid machine learning based prediction of shear capacity for steel fiber reinforced concrete beams, *Sustainability*, 12(7) (2020) 2709.

[14] J. Rahman, K.S. Ahmed, N.I. Khan, K. Islam, S. Mangalathu, Data-driven shear strength prediction of steel fiber reinforced concrete beams using machine learning approach, *Engineering Structures*, 233 (2021) 111743.

[15] E. Alotaibi, O. Mostafa, N. Nassif, M. Omar, M.G. Arab, Prediction of Punching Shear Capacity for Fiber-Reinforced Concrete Slabs Using Neuro-Nomographs Constructed by Machine Learning, *Journal of Structural Engineering*, 147(6) (2021) 04021075.

[16] O.B. Olalusi, P.O. Awoyera, Shear capacity prediction of slender reinforced concrete structures with steel fibers using machine learning, *Engineering Structures*, 227 (2021) 111470.

[17] M. Kang, D.Y. Yoo, R. Gupta, Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 266 (2021) 121117.

[18] Y. Li et al., Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Employing Supervised Machine Learning Techniques, *Materials*, 15 (2022).

[19] D. Zheng et al., Flexural Strength Prediction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Using Artificial Intelligence, *Materials*, 15 (2022).

[20] A. Shatnawi et al., Shear Strength Prediction of Slender Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, *Buildings*, (2022).

[21] M. Ali et al., Genetic Programming-based Algorithms for Modeling SFRC at High Temperatures, *Composites Part C*, (2024).

[22] C. Cheng et al., Accurate Prediction of Punching Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Slabs, *Buildings*, (2024).

[23] M. Ali, L. Chen, Q. Qureshi, D. Alsekait, A. Khan, K. Arif, M. Luqman, D. Elminaam, A. Hamza, M. Khan, Genetic Programming-based Algorithms Application in Modeling the Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Exposed to Elevated Temperatures, *Composites Part C: Open Access*, (2024).

[24] H. Chen, J. Yang, X. Chen, A convolution-based deep learning approach for estimating compressive strength of fiber reinforced concrete at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, (2021).

[25] E. Sadrossadat, H. Basarir, A. Karrech, M. Elchalakani, Multi-objective mixture design and optimisation of steel fiber reinforced UHPC using machine learning algorithms and metaheuristics, *Engineering with Computers*, 38 (2021) 2569–2582.

[26] J. Li, K. Cheng, S. Wang, F. Morstatter, R.P. Trevino, J. Tang, H. Liu, Feature selection: A data perspective, *ACM Computing Surveys*, 50(6) (2017) 1–45.

[27] E. Romero, J.M. Sopena, G. Navarrete, R. Alquézar, Feature selection forcing overtraining may help to improve performance, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 3 (2003) 2181–2186.

- [28] M.H. Taghavi Parsa, M.R. Adlparvar, M. Esmaeili, Machine Learning-Based Empirical Formulations for Strength Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 13(1) (2024) 27–44.
- [29] G.C. McDonald, Ridge regression, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 1(1) (2009) 93–100.
- [30] ASTM, ASTM C150, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Philadelphia, 2009.
- [31] ASTM, ASTM C1602, Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, Philadelphia, 2006.
- [32] ASTM, ASTM A820/A820M, Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, Philadelphia, 2009.
- [33] ASTM, ASTM C29/C29M, Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate, ASTM International, 2020.
- [34] ASTM, ASTM C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, 2015.
- [35] ASTM, ASTM C136/C136M, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, 2014.
- [36] ACI 544-1R, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, *ACI Journal Proceedings*, 70(11) (1973).
- [37] ASTM, ASTM C1017, Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete, Philadelphia, 2007.
- [38] F.F. Wafa, S.A. Ashour, Mechanical properties of high strength fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 89(5) (1992) 449–455.