

Intelligent Optimization Of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete Mix Design Using The Charged System Search Algorithm: A Data-Driven Decision-Making Framework

Erfan Shirvani

Department of Civil Engineering, Ker.C.,
Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Mohammad Reza Habibi *

Department of Civil Engineering, Ker.C.,
Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Mohammad Hadi Tavana

Department of Civil Engineering, Ker.C.,
Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Mehrzad Tahamoli Rudsari

Department of Civil Engineering, Ker.C.,
Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Abstract

Self-compacting concrete (SCC), owing to its ability to flow and consolidate under its own weight, is considered one of the strategic materials for the construction of complex structures. The simultaneous dependence of its mechanical performance on the type, content, and combination of fibers has transformed mix design into a multivariable problem, making the application of intelligent data-driven approaches essential. The present study was conducted to intelligently optimize the mix design of self-compacting concrete reinforced with Forta, glass, and ceramic fibers and to develop a data-driven decision-support framework using the Charged System Search (CSS) algorithm. Data obtained from 274 experimental specimens cured for 7 to 180 days were analyzed, and multiple regression models were developed as surrogate models to predict compressive, tensile, and flexural strengths. The results showed that Forta fibers had the greatest positive effect on improving the mechanical performance of concrete compared with glass and ceramic fibers. Specifically, the mixture containing 5% Forta fibers achieved a compressive strength of 23.2 MPa, a tensile strength of 6.12 MPa, and a flexural strength of 10.30 MPa after 180 days of curing. Furthermore, in the single-objective optimization, the CSS algorithm proposed a mix design consisting of 0.73% Forta fibers, 0.88% glass fibers, 0.04% ceramic fibers, and a water-to-cement ratio of 0.387, which increased the compressive strength from 15.78 MPa to 22.29 MPa, representing a 41.3% improvement. In the multi-objective optimization, the tensile strength increased by 23.6%; however, this improvement was accompanied by a reduction in compressive strength, revealing the existence of a trade-off among the mechanical objectives. The R^2 values for the compressive, tensile, and flexural strength models were 0.514, 0.370, and 0.243, respectively, indicating that the model achieved higher predictive accuracy for compressive strength than for the other responses. The findings demonstrate that integrating data analysis with the Charged System Search algorithm provides an intelligent decision-support framework for screening the design space, selecting optimal mix designs, reducing the number of experimental tests, and supporting decision-making in the design process of self-compacting concrete. Nevertheless, independent experimental validation of the proposed optimal mix designs is essential before their implementation in practical applications.

Keywords: Self-compacting concrete; Mix design; Data analysis; Intelligent optimization; CSS; Decision-making

How to Cite: Shirvani,E , Habibi,M R , Tavana,M H and Tahamoli Rudsari,M . (2025). Intelligent Optimization Of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete Mix Design Using The Charged System Search Algorithm: A Data-Driven Decision-Making Framework. Journal of Intelligent Strategic Management .4(4), 897-922.

doi: 10.87453/bumara.3626.373601.437



Intelligent Strategic Management (JISM) in Development and Evolution is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

© Authors

* Corresponding Author : M.R.Habibi@iau.ac.ir

بهینه‌سازی هوشمند طرح اختلاط بتن خودمتراکم مسلح شده با الیاف‌های گوناگون با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار: رویکردی مبتنی بر تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری

عرفان شیروانی

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

محمد رضا حبیبی *

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

محمد هادی توانا

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

مهرزاد تحملی‌رودسری

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

بتن خودمتراکم به دلیل قابلیت جریان‌یابی و تراکم تحت وزن خود، یکی از مصالح راهبردی در اجرای سازه‌های پیچیده به‌شمار می‌آید. وابستگی هم‌زمان عملکرد مکانیکی آن به نوع، مقدار و ترکیب الیاف، طراحی طرح اختلاط را به مسئله‌ای چندمتغیره تبدیل کرده است که بهره‌گیری از روش‌های هوشمند مبتنی بر تحلیل داده‌ها را ضروری می‌سازد. پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی هوشمند طرح اختلاط بتن خودمتراکم مسلح شده با الیاف فورتا، شیشه و سرامیک و ارائه چارچوبی تصمیم‌یار مبتنی بر داده، با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار (CSS) انجام شد. داده‌های حاصل از ۲۷۴ نمونه آزمایشگاهی در سنین عمل‌آوری ۷ تا ۱۸۰ روز تحلیل و مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به عنوان مدل‌های جانشین برای پیش‌بینی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی توسعه یافتند. نتایج نشان داد الیاف فورتا در مقایسه با الیاف شیشه و سرامیک، بیشترین تأثیر را بر بهبود عملکرد مکانیکی بتن دارد. به‌گونه‌ای که مخلوط حاوی ۵ درصد الیاف فورتا در سن ۱۸۰ روز به مقاومت فشاری ۲۳/۲، مقاومت کششی ۶/۱۲ و مقاومت خمشی ۱۰/۳۰ مگاپاسکال دست یافت. همچنین، الگوریتم CSS در بهینه‌سازی تک‌هدفه، طرح اختلاطی شامل ۰/۷۳ درصد فورتا، ۰/۸۸ درصد شیشه، ۰/۰۴ درصد سرامیک و نسبت آب به سیمان ۰/۲۸۷ را پیشنهاد کرد که مقاومت فشاری را از ۱۵/۷۸ به ۲۲/۲۹ مگاپاسکال افزایش داد و بیانگر بهبود ۴۱/۳ درصدی بود. در بهینه‌سازی چندهدفه نیز مقاومت کششی ۲۳/۶ درصد افزایش یافت، هرچند این بهبود با کاهش مقاومت فشاری همراه بود و وجود مصالحه میان اهداف مکانیکی را آشکار ساخت. مقادیر R^2 برای مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۰/۵۱۴، ۰/۳۷۰ و ۰/۲۴۳ به دست آمد که بیانگر دقت بیشتر مدل در پیش‌بینی مقاومت فشاری نسبت به سایر پاسخ‌ها است. یافته‌ها نشان می‌دهد ترکیب تحلیل داده‌ها با الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار، چارچوبی تصمیم‌یار و هوشمند برای غربالگری فضای طراحی، انتخاب طرح‌های اختلاط بهینه، کاهش تعداد آزمایش‌های تجربی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در فرایند طراحی بتن خودمتراکم فراهم می‌آورد. با این حال، اعتبارسنجی آزمایشگاهی مستقل طرح‌های پیشنهادی پیش از به کارگیری در مقیاس اجرایی ضروری است.

کلیدواژه‌ها: بتن خودمتراکم، طرح اختلاط، تحلیل داده‌ها، بهینه‌سازی هوشمند، CSS، تصمیم‌گیری

استناد به این مقاله: شیروانی، عرفان و حبیبی، محمد رضا و توانا، محمد هادی و تحملی‌رودسری، مهرزاد. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی هوشمند طرح اختلاط بتن خودمتراکم مسلح شده با الیاف‌های گوناگون با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار: رویکردی مبتنی بر تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری. مدیریت استراتژیک هوشمند، ۴(۴)، ۸۹۷-۹۲۲.



مدیریت استراتژیک هوشمند (JISM) در توسعه و تکامل تحت مجوز بین‌المللی کپی‌رایت کامنز با شرایط انتساب-غیرتجاری ۴.۰ منتشر می‌شود.

© نویسندگان

* نویسنده مسئول: M.R.Habibi@iau.ac.ir

۱. مقدمه

صنعت ساخت و ساز جهان سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن مصرف می کند و بتن خودمتراکم (SCC) از جمله مصالح پیشرفته ای است که در دو دهه اخیر جایگاه مهمی در این صنعت یافته است. این نوع بتن که نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ توسط پروفیسور اوکامورا در ژاپن معرفی شد، توانایی پر کردن قالب های پیچیده و احاطه آرماتورهای متراکم را صرفاً تحت وزن خود دارد، بدون آنکه نیاز به ارتعاش مکانیکی خارجی باشد. بتن خودمتراکم به دلیل توانایی جریان یابی، پر کردن قالب و عبور از میان آرماتورهای متراکم بدون ارتعاش مکانیکی، یکی از دستاوردهای مهم فناوری بتن به شمار می رود. تعریف عملکردی SCC بر سه مؤلفه اصلی شامل قابلیت پرکنندگی، عبورپذیری و پایداری در برابر جداشدگی استوار است (Okamura and Ouchi, 2003; EFNARC, 2005). حذف ارتعاش، کاهش آلودگی صوتی، بهبود کیفیت سطح و

امکان بتن ریزی مقاطع پیچیده از مهم ترین مزایای این ماده هستند.

با وجود مزایای فراوان SCC، رفتار شکننده و ترد این بتن در برابر بارهای کششی و ضربه ای، محدودیت مهمی در کاربردهای سازه ای آن به شمار می رود. استفاده از الیاف مختلف در SCC یکی از مؤثرترین راهکارها برای غلبه بر این محدودیت است. الیاف فولادی، شیشه ای، پلی پروپیلنی و سرامیکی از جمله رایج ترین گزینه ها هستند که هر یک ویژگی های رئولوژیکی و مکانیکی متفاوتی به بتن می بخشند. با وجود این مزایا، مقاومت کششی پایین، گسترش سریع ترک و رفتار نسبتاً ترد ماتریس سیمانی، دامنه کاربرد سازه ای SCC را محدود می کند. افزودن الیاف می تواند از طریق پل زدن روی ترک ها، انتقال تنش پس از ترک خوردگی و افزایش جذب انرژی، رفتار مکانیکی بتن را بهبود دهد. با این حال، نوع، مقدار و ترکیب الیاف هم زمان بر مقاومت، روانی، ویسکوزیته و خطر انسداد اثر می گذارند؛ بنابراین بیشینه سازی یک مقاومت لزوماً به بهترین طرح اجرایی منجر نمی شود. Ferrara et al., 2012; Afrouhsabet and Ozbakkaloglu, 2015.

چالش اصلی در طراحی SCC الیافی، ایجاد توازن میان بهبود خواص مکانیکی و حفظ قابلیت خودتراکمی است. افزایش درصد الیاف معمولاً موجب کاهش روانی و احتمال انسداد می شود. روش های سنتی آزمون و خطا برای یافتن این توازن، هزینه بر و زمان طلب هستند. الگوریتم های فراابتکاری هوشمند، از جمله الگوریتم جستجوی ذرات باردار (CSS)، راه حل های نوینی برای این چالش ارائه می دهند. پژوهش حاضر با هدف آنالیز

عملکرد فنی بتن خودمتراکم الیافی و ارائه طرح اختلاط بهینه از طریق الگوریتم CSS انجام شده است. روش‌های متداول طراحی طرح اختلاط غالباً بر آزمون و خطا یا مدل‌های تجربی محدود تکیه دارند. در سال‌های اخیر، مدل‌های داده‌محور و الگوریتم‌های فراابتکاری برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص SCC توسعه یافته‌اند. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند روابط غیرخطی میان اجزای طرح اختلاط و مقاومت SCC را شناسایی کنند و همراه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تعداد آزمایش‌های فیزیکی را کاهش دهند (Mai et al., 2023; Bian et al., 2024; Inqiad et al., 2024; Khan et al., 2025).

با این حال، استفاده از مدل جانشین در بهینه‌سازی تنها زمانی قابل اتکا است که دقت پیش‌بینی، دامنه اعتبار مدل، هم‌خطی متغیرها و قیود فیزیکی به‌طور شفاف گزارش شوند. ارائه یک مقدار «بهینه» بدون تحلیل خطا، حساسیت وزن‌ها و امکان‌پذیری خروجی‌ها می‌تواند به طرح‌هایی منجر شود که از نظر عددی مطلوب، اما از نظر آزمایشگاهی غیرواقعی هستند.

هدف پژوهش حاضر، تحلیل یکپارچه عملکرد مکانیکی SCC مسلح‌شده با الیاف فورتا، شیشه و سرامیک و ارزیابی قابلیت الگوریتم جستجوی ذرات باردار برای پیشنهاد طرح‌های کاندید است. نوآوری پژوهش در چهار محور تعریف می‌شود: (۱) مقایسه هم‌زمان انواع منفرد و هیبریدی الیاف؛ (۲) گزارش هم‌زمان دقت آزمون، خطا و اعتبارسنجی متقابل مدل‌های جانشین؛ (۳) مقایسه صریح پیامدهای تک‌هدفه و چندهدفه؛ و (۴) تحلیل وزن‌ها، جبهه غیرمغلوب، هم‌خطی و رفتار همگرایی به‌عنوان کنترل کیفیت بهینه‌سازی.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱. بتن خودمتراکم

بتن خودمتراکم نوعی بتن با کارایی بسیار بالاست که می‌تواند تحت اثر وزن خود جریان یابد، قالب‌ها را پر کرده و آرماتورها را احاطه نماید؛ بدون آنکه نیازی به ارتعاش مکانیکی خارجی باشد. انستیتوی بتن آمریکا (ACI) این بتن را به‌عنوان مخلوطی تعریف می‌کند که صرفاً تحت وزن خود جریان یافته و متراکم می‌شود، در حالی که مقاومت کافی در برابر جداشدگی دانه‌ها را نیز حفظ می‌کند.

سه مشخصه اساسی بتن خودمتراکم عبارت‌اند از: (۱) قابلیت پرکنندگی که با آزمون اسلامپ فلو اندازه‌گیری می‌شود و باید بین ۵۵۰ تا ۸۵۰ میلیمتر باشد؛ (۲) عبورپذیری از

میان آرماتورهای متراکم که با آزمون L-Box ارزیابی شده و نسبت $H2/H1$ آن باید حداقل ۰٫۸ باشد؛ و (۳) مقاومت در برابر جداسازی که با آزمون V-Funnel سنجیده می‌شود.

۲-۲. الیاف در بتن خودمتراکم

الیاف فورتا از جنس پلیمر مرکب هستند و به دلیل پیوند قوی با ماتریس سیمانی، بهبود قابل توجهی در مقاومت کششی، خمشی و جذب انرژی بتن ایجاد می‌کنند. الیاف شیشه (GFRC) از نوع مقاوم در برابر قلیایی (AR-Glass در SCC) به کار می‌روند و عملکرد مناسبی در بهبود مقاومت خمشی نشان می‌دهند. الیاف سرامیکی نیز به دلیل مقاومت بالا در برابر دماهای بالا ارزش کاربردی دارند، هرچند تأثیر محدودتری بر مقاومت‌های مکانیکی در دماهای معمولی از خود نشان می‌دهند.

بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که اکثر مطالعات پیشین به بررسی آزمایشگاهی تک‌بعدی اثر نوع خاصی از الیاف پرداخته‌اند. همچنین، پژوهش‌هایی که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند، عمدتاً از روش‌های متداول‌تری مانند GA و PSO بهره برده‌اند. استفاده از الگوریتم CSS برای بهینه‌سازی هم‌زمان رفتار رئولوژیکی، مکانیکی و شکست SCC الیافی نوآوری اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهد. مطابق راهنمای EFNARC، ارزیابی SCC باید ترکیبی از شاخص‌های جریان‌پذیری، سرعت جریان، عبورپذیری و پایداری باشد. در این پژوهش، اسلامپ فلو و T500 به عنوان شاخص‌های اصلی کارایی گزارش شده‌اند. مقدار بیشتر اسلامپ فلو نشان‌دهنده قابلیت پرمختندگی بالاتر است، درحالی‌که افزایش T500 بیانگر کاهش سرعت جریان است؛ ازاین‌رو این دو شاخص باید هم‌زمان تفسیر شوند. الیاف فورتا از خانواده الیاف پلیمری ماکرو سنتتیک‌اند و به‌طور معمول با کنترل عرض ترک و افزایش ظرفیت پس از ترک‌خوردگی مرتبط هستند. الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا می‌توانند رفتار خمشی را تقویت کنند، درحالی‌که عملکرد الیاف سرامیکی به هندسه، سطح ویژه، چسبندگی و درصد مصرف وابسته است. ترکیب هیبریدی ممکن است مزایای چند مقیاس مختلف الیاف را تلفیق کند، اما افزایش کل الیاف می‌تواند روانی و یکنواختی توزیع را کاهش دهد.

مدل جانشین، رابطه‌ای محاسباتی میان متغیرهای ورودی و پاسخ‌های آزمایشگاهی ایجاد می‌کند و در هر تکرار الگوریتم بهینه‌سازی جایگزین آزمایش فیزیکی می‌شود. مزیت رگرسیون خطی، شفافیت و قابلیت تفسیر ضرایب است؛ اما در حضور روابط غیرخطی،

برهم کنش‌ها و هم‌خطی شدید، دقت آن کاهش می‌یابد. (Mai et al. (2023) و مطالعات بعدی نشان داده‌اند که مدل‌های درختی و تقویتی می‌توانند برای پیش‌بینی مقاومت SCC الیافی دقت بالاتری فراهم کنند، ولی پیچیدگی و خطر بیش‌برازش آن‌ها نیز بیشتر است. ۲-۳. الگوریتم جستجوی ذرات باردار (CSS)

الگوریتم CSS در سال ۲۰۱۰ توسط کاوه و طلاطهری معرفی شد و بر اساس قوانین الکترواستاتیک کولمب و قوانین نیوتن بنا نهاده شده است و حرکت کاندیدها را با الهام از قوانین کولمب و نیوتن تنظیم می‌کند. هر نقطه باردار نماینده یک طرح اختلاط است؛ کیفیت تابع هدف، مقدار بار و جهت حرکت ذرات را تعیین می‌کند و حافظه الگوریتم بهترین جواب‌های پیشین را نگه می‌دارد. در مسائل مقید، تابع جریمه برای خروج از محدوده مواد، کارایی یا پاسخ‌های فیزیکی به تابع هدف افزوده می‌شود. این الگوریتم شامل سه مرحله اصلی است: (۱) تولید مجموعه‌ای از نقاط باردار (Charged Particles) (CP) - به صورت تصادفی در فضای طراحی؛ (۲) محاسبه بار الکتریکی هر CP و نیروی وارد بر آن از طرف سایر ذرات؛ و (۳) محاسبه مکان جدید هر CP بر اساس قوانین حرکت نیوتن. این الگوریتم دارای یک حافظه (CM) است که بهترین نتایج را ذخیره کرده و از آن‌ها برای هدایت سایر ذرات استفاده می‌کند. مزیت اصلی CSS نسبت به PSO و GA، توانایی جستجوی دقیق‌تر در فضاهای پیچیده و غیرخطی است.

۳. روش تحقیق

۳-۱. برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش ۲۷۴ نمونه بتن خودمترکم در ترکیب‌های متنوع شامل الیاف فورتا (دوزهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ درصد)، الیاف شیشه و سرامیک (در دوزهای مشابه)، و ترکیبات هیبریدی آن‌ها ساخته شدند. سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز مورد بررسی قرار گرفت. برای هر ترکیب آزمون‌های کارایی (اسلامپ فلو، T500، L-Box، V-Funnel و آزمون‌های مقاومت مکانیکی (فشاری، کششی، خمشی) انجام شد. پاسخ‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری (fc)، مقاومت کششی (ft) و مقاومت خمشی (ff) و پاسخ‌های کارایی شامل اسلامپ فلو و T500 بودند. جدول ۱، ساختار متغیرهای مورد استفاده در تحلیل و بهینه‌سازی نشان می‌دهد.

جدول ۱: ساختار متغیرهای مورد استفاده در تحلیل و بهینه‌سازی

گروه متغیر	متغیر/نماد	نقش در تحلیل
اجزای پایه	سیمان، آب، سنگدانه ریز، سنگدانه درشت و W/C	ورودی مدل جانشین و تحلیل همبستگی
الیاف	Ceramic، Glass، Forta و TotalFiber	متغیرهای اصلی طراحی و حساسیت
زمان	CuringAge	کنترل رشد مقاومت با عمل‌آوری
مقاومت	ff (MPa)، ft، fc	اهداف تک‌هدفه و چندهدفه
کارایی	T500، Slump flow (mm) (s)	قیود اجرایی SCC

۲-۳. تحلیل توصیفی، همبستگی و استانداردسازی

برای مقایسه گروه‌ها در سن ۲۸ روز از نمودار جعبه‌ای استفاده شد تا میانه، دامنه بین چارکی و پراکندگی نمایش داده شود. روند میانگین پاسخ‌ها بر حسب سن عمل‌آوری برای هر نوع الیاف نیز ترسیم شد. ضریب همبستگی پیرسون برای غربالگری روابط خطی محاسبه شد. از آنجا که ماتریس همبستگی وجود روابط کامل یا نزدیک به کامل میان برخی ورودی‌ها را نشان داد، ضرایب رگرسیون استاندارد شده صرفاً به عنوان شاخص جهت و اهمیت نسبی تفسیر شدند، نه اثر علی مستقل.

۳-۳. مدل‌سازی رگرسیون و CSS

از رگرسیون خطی چندمتغیره برای ایجاد معادلاتی که رابطه بین متغیرهای ورودی (مقدار سیمان، آب، سنگدانه‌ها، نوع و درصد الیاف، سن عمل‌آوری) و خروجی‌ها (مقاومت فشاری، کششی، خمشی) را توصیف می‌کنند، استفاده شد. این معادلات به عنوان مدل جانشین در الگوریتم CSS به کار رفتند. بهینه‌سازی در محیط MATLAB اجرا شد. پارامترهای ورودی الگوریتم شامل مقادیر اجزای طرح اختلاط و درصد هر نوع الیاف بودند. دو رویکرد بهینه‌سازی در نظر گرفته شد: (الف) بهینه‌سازی تک‌هدفه با هدف بیشینه‌سازی مقاومت فشاری؛ (ب) بهینه‌سازی چندهدفه با توازن هم‌زمان سه مقاومت. اعتبارسنجی مدل‌ها با روش اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی ۵-Fold CV انجام شد. برای هر یک از پاسخ‌های ft، fc و ff یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره برازش شد. فرم عمومی مدل به صورت زیر است:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum \beta_j x_j + \varepsilon$$

عملکرد مدل‌ها با R^2 در مجموعه آزمون، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی ارزیابی شد. نمودار مقدار اندازه‌گیری شده در برابر مقدار پیش‌بینی شده برای تشخیص سوگیری، فشردگی دامنه پیش‌بینی و نقاط دورافتاده به کار رفت.

در بهینه‌سازی تک‌هدفه، هدف بیشینه‌سازی مقاومت فشاری پیش‌بینی شده با رعایت حدود متغیرها و قیود کارایی بود. در بهینه‌سازی چندهدفه، مقاومت‌ها ابتدا نرمال و سپس در یک تابع وزن‌دار تجمیع شدند:

$$\text{Max } F(x) = w_{fc} \cdot fc^* + w_{ft} \cdot ft^* + w_{ff} \cdot ff^* - P(x)$$

در رابطه فوق، مجموع وزن‌ها برابر یک است و $P(x)$ جریمه نقض قیود است. برای بررسی حساسیت نتایج به ترجیحات تصمیم‌گیرنده، ۵۴ ترکیب وزنی اجرا شد. نقاطی که پاسخ مکانیکی غیرمثبت تولید کردند، از تحلیل جبهه قابل قبول حذف شدند. یک نقطه زمانی غیرمغلوب تلقی شد که هیچ نقطه دیگری هر سه مقاومت را هم‌زمان با حداقل یک برتری اکید افزایش ندهد.

۳-۴. ملاحظات اعتبار نتایج بهینه‌سازی

دو کنترل برای جلوگیری از تفسیر نادرست اعمال شد: نخست، خروجی تابع جریمه‌دار همگرایی به عنوان «امتیاز تابع هدف» گزارش شد و نه مقاومت بر حسب MPa؛ دوم، خروجی‌های جاروب وزن‌ها به عنوان کاندیدهای مدل‌محور تلقی شدند و نه طرح‌های تأییدشده آزمایشگاهی. این تمایز برای مدل‌هایی با R^2 متوسط ضروری است.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. توزیع مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر حسب نوع الیاف

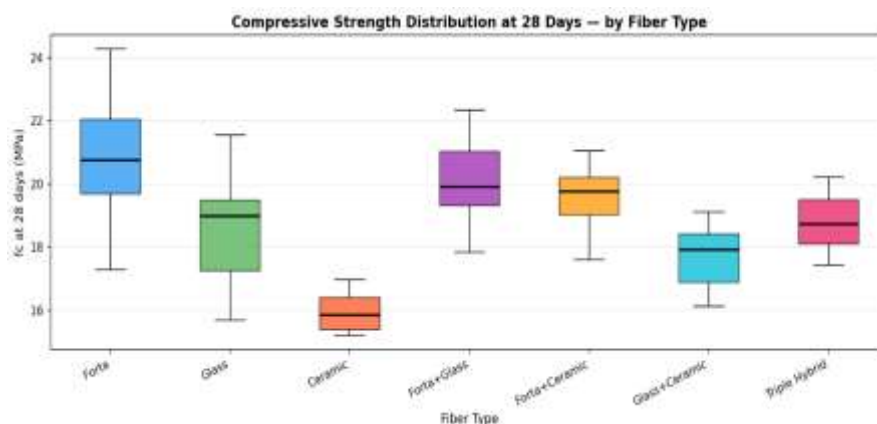
نمودار جعبه‌ای در شکل ۱، توزیع مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن خودمترکم را برای هفت سیستم الیافی نشان می‌دهد. خط سیاه داخل هر جعبه بیانگر میانه، بخش پایین و بالای جعبه به ترتیب نشان‌دهنده چارک اول و سوم، و طول جعبه نشان‌دهنده دامنه بین چارکی یا پراکندگی ۵۰ درصد میانی داده‌ها است. خطوط انتهایی نیز دامنه کلی مقادیر مشاهده شده را نشان می‌دهند. در نمودار حاضر، نقطه‌ای به عنوان داده پرت نمایش داده نشده است. مخلوط Forta بالاترین میانه مقاومت فشاری را در میان تمام گروه‌ها نشان می‌دهد. میانه این گروه حدود ۲۰٫۸ مگاپاسکال است و ۵۰ درصد میانی نتایج تقریباً بین ۱۹٫۷ تا ۲۲٫۰ مگاپاسکال قرار دارند. حداکثر مقاومت مشاهده شده نیز نزدیک به ۲۴٫۳ مگاپاسکال است.

که بیشترین مقدار کل نمودار محسوب می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که الیاف فورتا بیشترین ظرفیت را برای ارتقای مقاومت فشاری ۲۸ روزه فراهم کرده‌اند. نمودار جعبه‌ای مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان داد که نوع الیاف اثر قابل توجهی بر مقدار مرکزی و پراکندگی نتایج دارد. مخلوط حاوی الیاف فورتا با میانه تقریبی ۲۰,۸ مگاپاسکال، بیشترین مقاومت فشاری را ثبت کرد.

پس از آن، مخلوط‌های فورتا+شیشه و فورتا+سرامیک با میانه‌های تقریباً ۱۹,۹ و ۱۹,۸ مگاپاسکال قرار گرفتند. نزدیکی میانه‌ها و هم‌پوشانی جعبه‌های این دو سیستم نشان می‌دهد که عملکرد فشاری آن‌ها احتمالاً مشابه است. مخلوط سرامیکی با میانه حدود ۱۵,۹ مگاپاسکال کمترین مقاومت را داشت، هرچند توزیع محدود آن بیانگر تکرارپذیری بیشتر نتایج در سطح مقاومت پایین بود. مخلوط فورتا بیشترین دامنه تغییرات را نشان داد، درحالی‌که ترکیب فورتا+سرامیک، با برخورداری از مقاومت نسبتاً بالا و دامنه بین‌چارکی محدود، تعادل مناسبی میان ظرفیت مکانیکی و یکنواختی نتایج فراهم کرد.

سیستم سه‌گانه نیز نتوانست از مخلوط‌های دوتایی حاوی فورتا پیشی بگیرد که می‌تواند ناشی از کاهش کارایی، پراکندگی نامناسب الیاف یا افزایش تخلخل در اثر حضور هم‌زمان سه نوع الیاف باشد. نتایج نشان می‌دهد که فورتا بهترین گزینه برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه است. با این حال، این مخلوط بیشترین پراکندگی را نیز دارد.

ترکیب فورتا+سرامیک از نظر ایجاد مقاومت بالا همراه با توزیع یکنواخت‌تر، عملکرد متعادل‌تری ارائه می‌دهد. مخلوط فورتا+شیشه نیز مقاومت بالایی دارد، اما پراکندگی آن اندکی بیشتر از فورتا+سرامیک است. در مقابل، الیاف سرامیکی به‌تنهایی کمترین مقاومت را ایجاد کرده‌اند و سیستم سه‌گانه نیز مزیت مکانیکی مشخصی نسبت به سیستم‌های دوتایی نشان نداده است.



شکل ۱: توزیع مقاومت فشاری ۲۸ روزه در گروه‌های مختلف الیاف؛ خط مرکزی نشان‌دهنده میانه و جعبه نشان‌دهنده دامنه بین چارکی

۴-۲. اثر سن عمل‌آوری بر پاسخ‌های مکانیکی

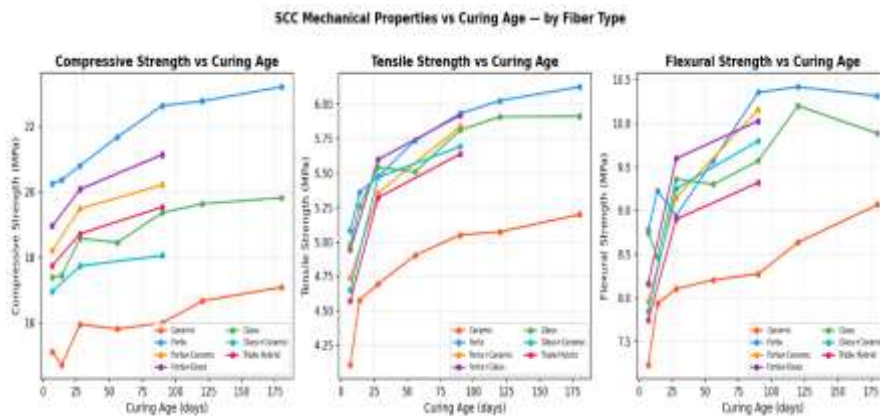
نتایج شکل ۲، نشان می‌دهد که افزایش سن عمل‌آوری موجب بهبود کلی خواص مکانیکی بتن خودمتراکم شده است، اما میزان این بهبود به نوع الیاف بستگی دارد. در مقاومت فشاری، مخلوط حاوی Forta در تمام سنین بهترین عملکرد را داشته و مقاومت آن از حدود ۲۰,۲ مگاپاسکال در ۷ روز به ۲۰,۸ مگاپاسکال در ۲۸ روز، ۲۲,۶ مگاپاسکال در ۹۰ روز و ۲۳,۲ مگاپاسکال در ۱۸۰ روز رسیده است؛ یعنی حدود ۱۵ درصد افزایش نسبت به سن ۷ روز. در سن ۹۰ روز، مقاومت فشاری مخلوط‌های Forta+Glass، Forta+Ceramic، Glass+Ceramic، Glass، Triple Hybrid، Ceramic و به ترتیب حدود ۲۱,۲، ۲۰,۲، ۱۹,۶، ۱۹,۴، ۱۸,۱ و ۱۶,۰ مگاپاسکال بوده است. بنابراین، مقاومت فشاری فورتا در این سن تقریباً ۴۱ درصد بیشتر از مخلوط سرامیکی بوده است. پایین‌ترین مقاومت فشاری در تمام سنین مربوط به الیاف سرامیکی است که از حدود ۱۵,۱ مگاپاسکال در ۷ روز به تنها ۱۷,۱ مگاپاسکال در ۱۸۰ روز افزایش یافته است.

در مقاومت کششی نیز فورتا و ترکیب فورتا-شیشه بالاترین مقادیر را ثبت کرده‌اند. مقاومت کششی فورتا از حدود ۵,۰۸ مگاپاسکال در ۷ روز به ۵,۴۸ مگاپاسکال در ۲۸ روز، ۵,۹۲ مگاپاسکال در ۹۰ روز و ۶,۱۲ مگاپاسکال در ۱۸۰ روز رسیده که معادل حدود ۲۰,۵ درصد رشد است. در سن ۹۰ روز، مقاومت کششی Forta و Forta+Glass تقریباً برابر و به ترتیب حدود ۵,۹۳ و ۵,۹۲ مگاپاسکال بوده است؛ پس از آن، مخلوط‌های Ceramic و Triple Hybrid، Glass+Ceramic، Glass، Forta+Ceramic

به ترتیب حدود ۵,۸۴، ۵,۸۱، ۵,۶۹، ۵,۶۴ و ۵,۰۵ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند. اگرچه مخلوط
سرامیکی از حدود ۴,۱۰ به ۵,۲۰ مگاپاسکال رسیده و نزدیک به ۲۷ درصد افزایش داشته
است، مقدار نهایی آن همچنان از سایر مخلوط‌ها کمتر باقی مانده است.

در مقاومت خمشی، بیشترین عملکرد بلندمدت نیز متعلق به فورتا است؛ به طوری که مقدار
آن از حدود ۸,۷۸ مگاپاسکال در ۷ روز به ۸,۹۳ مگاپاسکال در ۲۸ روز، ۱۰,۳۵ مگاپاسکال
در ۹۰ روز، ۱۰,۴۲ مگاپاسکال در ۱۲۰ روز و ۱۰,۳۱ مگاپاسکال در ۱۸۰ روز رسیده است.
در سن ۹۰ روز، مقاومت خمشی مخلوط‌های Forta، Forta+Ceramic، Forta+Glass،
Glass، Triple Hybrid، Glass+Ceramic و Ceramic به ترتیب
حدود ۱۰,۳۵، ۱۰,۱۵، ۱۰,۰۲، ۹,۷۹، ۹,۵۷، ۹,۳۲ و ۸,۲۷ مگاپاسکال بوده است. بنابراین،
فورتا در این سن حدود ۲۵ درصد مقاومت خمشی بیشتری نسبت به الیاف سرامیکی ایجاد
کرده است. در مجموع، فورتا بهترین عملکرد هم‌زمان فشاری، کششی و خمشی را نشان
داده و ترکیب‌های Forta+Glass و Forta+Ceramic نیز عملکرد مطلوبی داشته‌اند؛
در حالی که سیستم سه گانه، با وجود حضور سه نوع الیاف، نتوانسته است از ترکیب‌های
دوتایی حاوی فورتا پیشی بگیرد. مقادیر ذکر شده به صورت تقریبی از نمودار استخراج
شده‌اند. شکل ۲ رشد مقاومت‌ها را در بازه ۷ تا ۱۸۰ روز نشان می‌دهد. فورتا در تقریباً تمام
سنین بیشترین مقاومت فشاری را حفظ کرد و از حدود ۲۰,۲ مگاپاسکال در ۷ روز به
حدود ۲۳,۲ مگاپاسکال در ۱۸۰ روز رسید. مقاومت کششی فورتا نیز تا حدود ۶,۱
مگاپاسکال افزایش یافت. پاسخ خمشی فورتا پس از رشد اولیه در محدوده ۱۰,۳ تا ۱۰,۴
مگاپاسکال تقریباً پایدار شد.

شیشه رشد تدریجی و نسبتاً پایدار نشان داد و در سنین بالاتر به مقاومت فشاری نزدیک
۱۹,۸ و مقاومت خمشی نزدیک ۹,۹ مگاپاسکال رسید. سرامیک در هر سه پاسخ پایین‌تر
بود، اگرچه افزایش سن بخشی از ضعف اولیه را جبران کرد. منحنی‌های ترکیبات هیبریدی
نشان می‌دهند که فورتا-شیشه در سنین میانی می‌تواند به پاسخ‌های نزدیک به فورتا منفرد
برسد. با این حال، از آنجا که نقاط هر منحنی ممکن است شامل دوزهای متفاوت باشند،
این نمودار بیانگر روند گروهی است و نباید به عنوان اثر خالص سن برای یک طرح ثابت
تفسیر شود.



شکل ۲: تغییر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر حسب سن عمل آوری برای گروه‌های مختلف الیاف

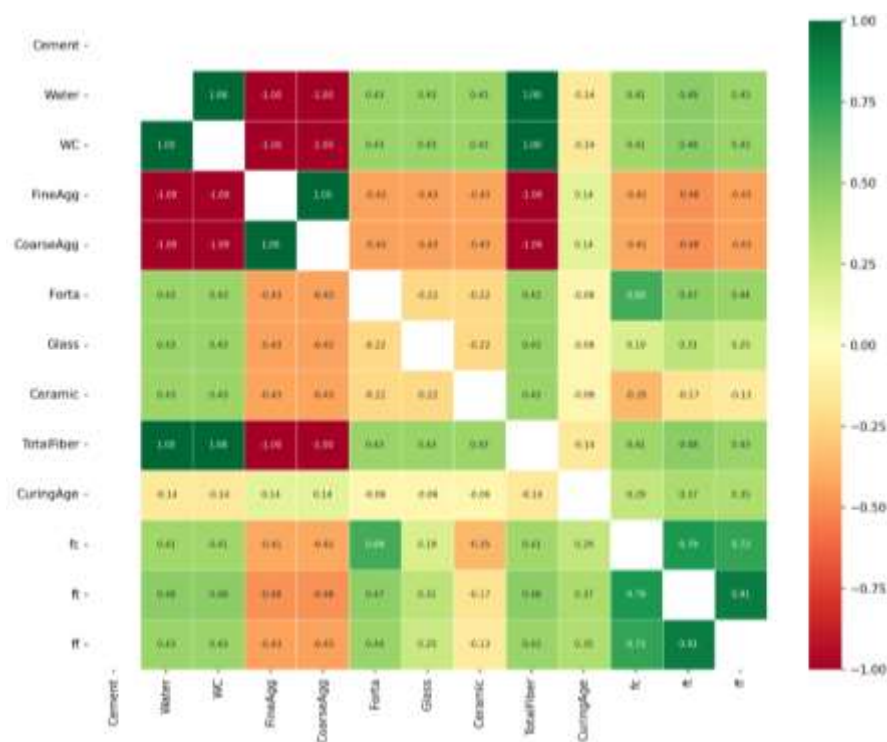
۳-۴. ساختار همبستگی و مسئله هم خطی

ماتریس همبستگی پیرسون شکل ۳، نشان می‌دهد که در میان انواع الیاف، الیاف فورتا قوی‌ترین ارتباط مثبت با خواص مکانیکی بتن خودمترکم را دارد. ضریب همبستگی فورتا با مقاومت فشاری f_c ، کششی f_t و خمشی f_f به ترتیب برابر با ۰٫۶۹، ۰٫۴۷، ۰٫۴۴ است؛ بنابراین، افزایش سهم فورتا بیش از سایر الیاف با بهبود مقاومت فشاری همراه بوده است. الیاف شیشه نیز با هر سه مقاومت همبستگی مثبت، اما ضعیف‌تری نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که ضرایب آن برای مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۰٫۱۹، ۰٫۳۱ و ۰٫۲۵ است. در مقابل، الیاف سرامیکی با مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب همبستگی‌های منفی -۰٫۳۵، -۰٫۱۷ و -۰٫۱۳ دارد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سرامیک، به‌ویژه برای مقاومت فشاری، نسبت به فورتا و شیشه عملکرد نامطلوب‌تری داشته است. سن عمل آوری با هر سه شاخص مقاومتی ارتباط مثبت دارد، اما شدت آن در محدوده ضعیف تا متوسط است. همبستگی سن عمل آوری با مقاومت فشاری ۰٫۲۹، با مقاومت کششی ۰٫۳۷ و با مقاومت خمشی ۰٫۳۵ به دست آمده است. بنابراین، اثر افزایش سن بر مقاومت کششی و خمشی کمی بیشتر از مقاومت فشاری بوده است. مقدار کل الیاف نیز با مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ضرایب ۰٫۴۱، ۰٫۴۸ و ۰٫۴۳ را نشان می‌دهد که بیانگر ارتباط مثبت متوسط میان مقدار کل الیاف و عملکرد مکانیکی است. همچنین، مقاومت‌های مکانیکی به شدت با یکدیگر مرتبط‌اند؛ بیشترین همبستگی میان مقاومت کششی و خمشی با مقدار ۰٫۹۱ مشاهده شده است، درحالی‌که ضرایب همبستگی مقاومت فشاری با مقاومت کششی و خمشی به ترتیب ۰٫۷۹ و ۰٫۷۳ هستند. این روابط قوی نشان می‌دهند مخلوط‌هایی

که عملکرد کششی بهتری دارند، معمولاً در خمش نیز عملکرد بسیار بهتری نشان می‌دهند. با این حال، وجود همبستگی‌های کامل $\pm 1,00$ میان برخی متغیرهای طرح اختلاط باید با احتیاط تفسیر شود. آب، نسبت آب به سیمان و مقدار کل الیاف با یکدیگر همبستگی $1,00$ دارند و با سنگ‌دانه‌های ریز و درشت همبستگی $-1,00$ نشان می‌دهند؛ همچنین سنگ‌دانه ریز و درشت نیز با یکدیگر همبستگی $1,00$ دارند. این وضعیت احتمالاً ناشی از ساختار محدود و وابسته طرح‌های اختلاط است؛ یعنی با افزایش یک جزء، سایر اجزا براساس یک الگوی ثابت کاهش یا افزایش یافته‌اند. بنابراین، این ضرایب لزوماً رابطه فیزیکی مستقل یا علی را نشان نمی‌دهند و بیانگر هم‌خطی شدید میان متغیرها هستند. برای مدل‌سازی رگرسیونی، ورود هم‌زمان این متغیرها می‌تواند ضرایب ناپایدار ایجاد کند؛ از این رو، استفاده از شاخص VIF، حذف متغیرهای تکراری یا روش‌هایی مانند رگرسیون Ridge و PLS توصیه می‌شود.

نتایج ارزیابی مدل نشان می‌دهد که دقت پیش‌بینی برای سه پاسخ مکانیکی یکسان نبوده و مدل بهترین عملکرد را برای مقاومت فشاری (fc) ارائه کرده است. برای این پاسخ، مقدار R^2 در مجموعه آزمون برابر با $0,514$ بود؛ بنابراین مدل توانسته است حدود $51,4\%$ درصد از تغییرات مقاومت فشاری داده‌های آزمون را توضیح دهد. مقادیر RMSE برابر $1,391$ مگاپاسکال و MAE برابر $1,088$ مگاپاسکال نشان می‌دهند که خطای معمول پیش‌بینی مقاومت فشاری حدود 1 تا $1,4$ مگاپاسکال بوده است. همچنین، میانگین R^2 در اعتبارسنجی پنج‌تایی برابر با $0,699 \pm 0,699$ ، $0,950$ pm به دست آمد که بیانگر عملکرد نسبتاً مناسب و پایدار مدل در زیرمجموعه‌های مختلف داده است. بالاتر بودن R^2 اعتبارسنجی نسبت به مجموعه آزمون می‌تواند نشان دهد که مجموعه آزمون نهایی شامل نمونه‌های دشوارتر یا توزیع متفاوت‌تری نسبت به برخی فولدهای اعتبارسنجی بوده است. برای مقاومت کششی (ft، مقدار R^2) آزمون برابر با $0,370$ بود؛ یعنی مدل حدود 37% درصد از تغییرات مقاومت کششی را توضیح داده است. مقادیر RMSE و MAE نیز به ترتیب $0,526$ و $0,411$ مگاپاسکال بودند. اگرچه این خطاها از نظر عددی کمتر از مقاومت فشاری هستند، مقایسه مستقیم آن‌ها باید با توجه به مقیاس کوچک‌تر مقاومت کششی انجام شود. اعتبارسنجی پنج‌تایی مقدار $R^2 = 0.560 \pm 0.115$ را نشان داد که عملکرد متوسط مدل را تأیید می‌کند، اما انحراف معیار $0,115$ بیانگر حساسیت بیشتر مدل به نحوه تقسیم داده‌ها است. این موضوع احتمالاً به محدود بودن تعداد نمونه‌ها، پراکندگی

آزمایشگاهی و پیچیدگی رابطه میان ترکیب الیاف و رفتار کششی مربوط است. ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به مقاومت خمشی (f_{ff} بود. مقدار R^2) آزمون برابر با ۰,۲۴۳ نشان می‌دهد که مدل تنها حدود ۲۴,۳ درصد از تغییرات مقاومت خمشی را توضیح داده است. مقادیر RMSE برابر ۱,۰۷۱ مگاپاسکال و MAE برابر ۰,۸۹۲ مگاپاسکال نیز وجود خطای پیش‌بینی قابل توجه را نشان می‌دهند. میانگین R^2 اعتبارسنجی پنج‌تایی برابر ۰,۱۲۷، $\pm ۰,۴۳۷$ بود که علاوه بر قدرت پیش‌بینی محدود، بیشترین نوسان میان فولدها را نیز نشان می‌دهد. در مجموع، رتبه عملکرد مدل‌ها به صورت $f_c > f_t > f_{ff}$ است. این نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای طرح اختلاط و سن عمل‌آوری برای پیش‌بینی مقاومت فشاری اطلاعات بیشتری فراهم می‌کنند، درحالی‌که پیش‌بینی مقاومت خمشی احتمالاً به متغیرهای تکمیلی مانند جهت‌گیری و پراکندگی الیاف، تخلخل، کارایی مخلوط و کیفیت ناحیه انتقال الیاف-ماتریس نیاز دارد.



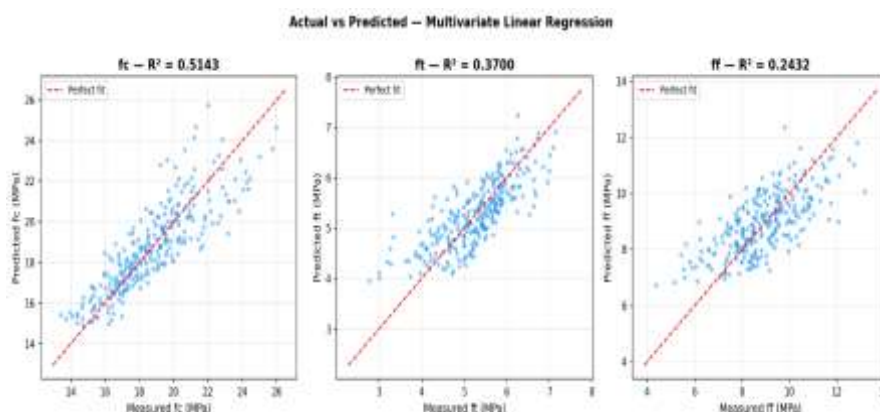
شکل ۳: ماتریس همبستگی پیرسون متغیرهای طرح اختلاط و مقاومت‌ها

جدول ۲: شاخص‌های عملکرد مدل‌های رگرسیون چندمتغیره

پاسخ	R^2 آزمون	RMSE (MPa)	MAE (MPa)	R^2 اعتبارسنجی پنج تایی
fc	0.514	1.391	1.088	0.699 ± 0.095
ft	0.370	0.526	0.411	0.560 ± 0.115
ff	0.243	1.071	0.892	0.437 ± 0.127

نمودار مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که رگرسیون خطی چندمتغیره، بهترین عملکرد را برای مقاومت فشاری (fc) ارائه کرده است. مقدار $R^2=0.5143$ بیان می‌کند که مدل حدود ۵۱٫۴ درصد از تغییرات مقاومت فشاری را توضیح می‌دهد. بیشتر نقاط در محدوده مقاومت واقعی ۱۶ تا ۲۱ مگاپاسکال نسبتاً نزدیک به خط برازش کامل قرار گرفته‌اند، اما با افزایش فاصله از میانگین، خطا بیشتر شده است. برای نمونه، برخی مقادیر واقعی پایین‌تر از حدود ۱۵ مگاپاسکال در محدوده ۱۵ تا ۱۶ مگاپاسکال پیش‌بینی شده‌اند؛ درحالی‌که برای نمونه‌های با مقاومت واقعی حدود ۲۴ تا ۲۶ مگاپاسکال، مدل عمدتاً مقادیری نزدیک به ۲۱ تا ۲۴٫۵ مگاپاسکال ارائه کرده است. بنابراین، مدل تمایل دارد مقاومت‌های پایین را بیش‌برآورد و مقاومت‌های بالا را کم‌برآورد کند. این الگو با مقادیر RMSE برابر ۱٫۳۹۱ مگاپاسکال و MAE برابر ۱٫۰۸۸ مگاپاسکال سازگار است و نشان می‌دهد که خطای معمول پیش‌بینی مقاومت فشاری تقریباً بین ۱ تا ۱٫۴ مگاپاسکال قرار دارد. برای مقاومت کششی (ft)، مقدار $R^2=0.3700$ نشان می‌دهد که مدل تنها ۳۷ درصد از تغییرات داده‌ها را توضیح داده است. نقاط در محدوده واقعی تقریباً ۴٫۵ تا ۶٫۲ مگاپاسکال تمرکز بیشتری در اطراف خط برازش کامل دارند، اما در مقادیر حدی انحراف مشخصی دیده می‌شود. برای نمونه، مقاومت‌های واقعی حدود ۳ تا ۴ مگاپاسکال غالباً در محدوده ۴ تا ۴٫۸ مگاپاسکال پیش‌بینی شده‌اند، درحالی‌که برخی مقادیر واقعی نزدیک به ۶٫۵ تا ۷٫۲ مگاپاسکال حدود ۵٫۸ تا ۶٫۹ مگاپاسکال برآورد شده‌اند. مقادیر RMSE و MAE به ترتیب ۰٫۵۲۶ و ۰٫۴۱۱ مگاپاسکال هستند؛ بنابراین، اگرچه خطای مطلق آن از مقاومت فشاری کمتر است، قدرت توضیح‌دهندگی مدل همچنان متوسط بوده و بخشی از تغییرات رفتار کششی به عوامل ثبت‌نشده‌ای مانند نحوه توزیع، جهت‌گیری و پیوند الیاف با ماتریس وابسته است. ضعیف‌ترین تطابق مربوط به مقاومت خمشی (ff با $R^2=0.2432$) است؛ یعنی مدل فقط حدود ۲۴٫۳ درصد از تغییرات مقاومت خمشی را توضیح داده است. پراکندگی نقاط نسبت به خط برازش کامل زیاد است و اثر فشرده‌شدن پیش‌بینی‌ها به سمت میانگین به وضوح مشاهده می‌شود. مقادیر واقعی

پایین، حدود ۴,۵ تا ۶,۵ مگاپاسکال، معمولاً در محدوده بالاتر ۶,۵ تا ۸,۵ مگاپاسکال پیش‌بینی شده‌اند، درحالی‌که برای مقاومت‌های واقعی بالاتر از ۱۱ تا ۱۳,۵ مگاپاسکال، پیش‌بینی‌ها عمدتاً بین ۹ تا ۱۱,۸ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند. مقادیر RMSE برابر ۱,۰۷۱ مگاپاسکال و MAE برابر ۰,۸۹۲ مگاپاسکال نیز خطای نسبتاً زیاد مدل را تأیید می‌کنند. در مجموع، عملکرد مدل به ترتیب $fc > ft > ff$ است و انحراف نظام‌مند نقاط از خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که یک رابطه خطی ساده برای بازنمایی کامل رفتار کششی و به‌ویژه خمشی کافی نیست؛ بنابراین، افزودن متغیرهای مرتبط با هندسه، پراکندگی و جهت‌گیری الیاف یا استفاده از مدل‌های غیرخطی می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد.



شکل ۴: مقادیر اندازه‌گیری‌شده در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده برای سه مدل رگرسیون

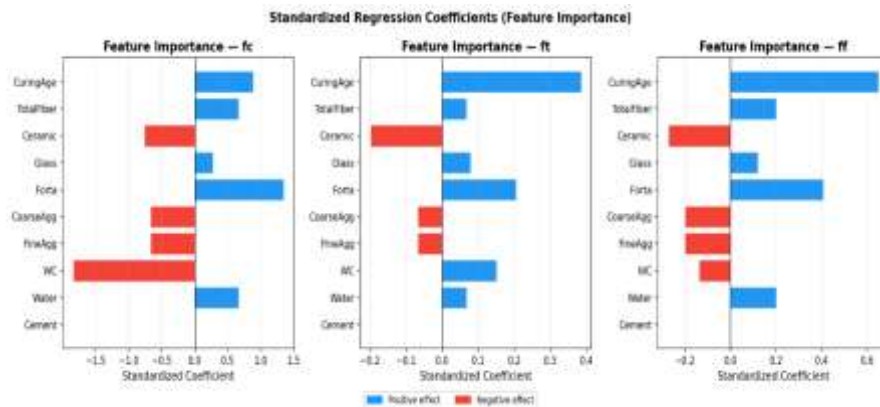
۴-۴. ضرایب استانداردشده و تحلیل حساسیت الیاف

ضرایب استانداردشده نشان می‌دهند که اثر متغیرهای طرح اختلاط بر سه پاسخ مکانیکی متفاوت است. برای مقاومت فشاری (fc)، الیاف فورتا با ضریب تقریبی $\beta = +1.35$ مهم‌ترین عامل افزایشی است؛ یعنی با ثابت‌بودن سایر متغیرها، افزایش یک انحراف معیار در مقدار فورتا با حدود ۱,۳۵ انحراف معیار افزایش در مقاومت فشاری همراه است. پس از آن، سن عمل‌آوری با $\beta \approx +0.90$ و مقدار کل الیاف و آب، هرکدام با حدود $\beta \approx +0.67$ ، اثر مثبت دارند. در مقابل، نسبت آب به سیمان قوی‌ترین اثر منفی را با $\beta \approx -1.84$ نشان می‌دهد. الیاف سرامیکی نیز با ضریب حدود -0.76 و سنگ‌دانه‌های ریز و درشت هرکدام با حدود -0.66 ، با کاهش مقاومت فشاری مرتبط‌اند. اثر الیاف شیشه نسبتاً محدود و مثبت است و ضریب آن حدود 0.27 برآورد شده است. در مدل مقاومت کششی (ft)، سن عمل‌آوری با ضریب تقریبی $+0.39$ ، مهم‌ترین متغیر است و پس از آن فورتا با

$\beta \approx +0.20$ قرار دارد. نسبت آب به سیمان برخلاف مدل مقاومت فشاری، ضریب مثبت حدود $+0.15$ نشان می‌دهد، درحالی‌که اثر شیشه، آب و مقدار کل الیاف محدود و به ترتیب حدود $+0.08$ ، $+0.07$ و $+0.07$ است. الیاف سرامیکی با ضریب -0.20 بیشترین اثر منفی را بر مقاومت کششی دارد و ضرایب سنگ‌دانه ریز و درشت نیز هرکدام تقریباً -0.07 هستند. بنابراین، تغییرات مقاومت کششی بیش از مقدار کلی الیاف، به سن عمل‌آوری و حضور فورتا وابسته بوده است.

برای مقاومت خمشی (ff) نیز سن عمل‌آوری با ضریب حدود $+0.65$ مهم‌ترین عامل افزایشی محسوب می‌شود. فورتا با $\beta \approx +0.41$ دومین متغیر مؤثر است و مقدار کل الیاف و آب هرکدام ضریبی نزدیک به $+0.20$ دارند. الیاف شیشه اثر مثبت اما ضعیف‌تری با ضریب حدود $+0.12$ نشان می‌دهد. در مقابل، الیاف سرامیکی با $\beta \approx -0.27$ بیشترین اثر منفی را دارد؛ سنگ‌دانه‌های ریز و درشت هرکدام حدود -0.20 و نسبت آب به سیمان حدود -0.14 برآورد شده‌اند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که فورتا مهم‌ترین نوع الیاف برای افزایش مقاومت فشاری است، درحالی‌که سن عمل‌آوری مهم‌ترین عامل در توسعه مقاومت کششی و خمشی محسوب می‌شود. الیاف سرامیکی در هر سه مدل اثر منفی داشته و استفاده از شیشه تنها بهبود محدودتری ایجاد کرده است.

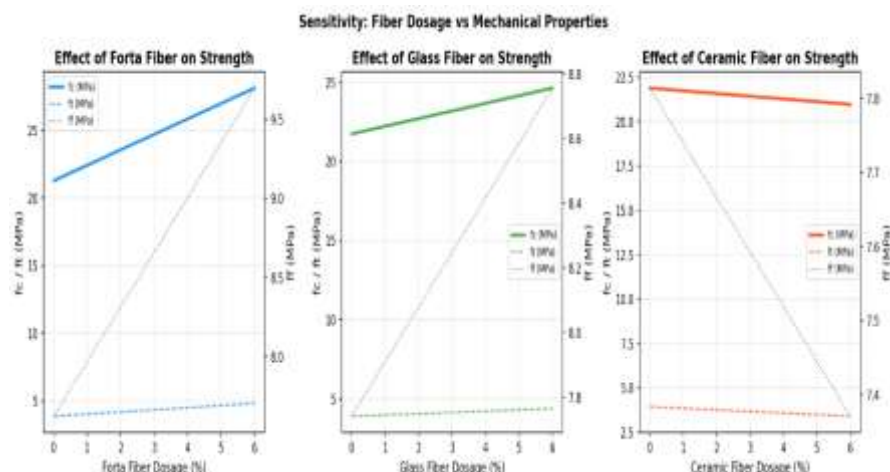
بااین‌حال، این ضرایب باید با احتیاط تفسیر شوند؛ زیرا ماتریس همبستگی قبلی وجود هم‌خطی بسیار شدید و حتی همبستگی‌های ± 1.00 میان آب، نسبت آب به سیمان، مقدار کل الیاف و مقادیر سنگ‌دانه را نشان داد. در چنین شرایطی، علامت و اندازه ضرایب رگرسیون ممکن است ناپایدار باشد؛ برای مثال، مثبت شدن ضریب نسبت آب به سیمان در مدل کششی می‌تواند ناشی از هم‌خطی باشد، نه یک اثر فیزیکی واقعی. بنابراین، برای تعیین اهمیت قابل‌اعتماد متغیرها، بررسی VIF یا استفاده از رگرسیون Ridge، LASSO یا PLS ضروری است.



شکل ۵: ضرایب استاندارد شده رگرسیون به عنوان شاخص جهت و اهمیت نسبی متغیرها

تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که افزایش مقدار الیاف فورتا بیشترین اثر مثبت را بر هر سه ویژگی مکانیکی بتن خودمتراکم دارد. با افزایش دوز فورتا از ۰ به ۶ درصد، مقاومت فشاری fc از حدود ۲۱,۲ به ۲۸,۱ مگاپاسکال می‌رسد؛ یعنی حدود ۶,۹ مگاپاسکال یا ۳۲,۵ درصد افزایش. مقاومت کششی ft نیز تقریباً از ۳,۹ به ۴,۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد که معادل حدود ۰,۹ مگاپاسکال یا ۲۳ درصد است. مقاومت خمشی ff نیز از حدود ۷,۸ به ۹,۷ مگاپاسکال می‌رسد و نزدیک به ۱,۹ مگاپاسکال یا ۲۴ درصد افزایش نشان می‌دهد. بر این اساس، به ازای هر یک درصد افزایش فورتا، مقاومت فشاری، کششی و خمشی به‌طور متوسط به ترتیب حدود ۱,۱۵، ۰,۱۵ و ۰,۳۲ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. الیاف شیشه نیز اثر مثبت دارد، اما شدت آن به مراتب کمتر از فورتا است. با افزایش دوز شیشه از ۰ به ۶ درصد، مقاومت فشاری از حدود ۲۱,۷ به ۲۴,۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد؛ یعنی حدود ۲,۹ مگاپاسکال یا ۱۳ درصد. در همین محدوده، مقاومت کششی از حدود ۳,۹ به ۴,۴ مگاپاسکال و مقاومت خمشی از حدود ۷,۷۵ به ۸,۷۵ مگاپاسکال می‌رسند که به ترتیب تقریباً ۰,۵ و ۱,۰ مگاپاسکال افزایش را نشان می‌دهد. بنابراین، نرخ افزایش به ازای هر یک درصد الیاف شیشه تقریباً ۰,۴۸ مگاپاسکال برای مقاومت فشاری، ۰,۰۸ مگاپاسکال برای مقاومت کششی و ۰,۱۷ مگاپاسکال برای مقاومت خمشی است. این نتایج نشان می‌دهد که شیشه می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود دهد، اما کارایی آن تقریباً نصف یا کمتر از اثر فورتا است. در مقابل، افزایش مقدار الیاف سرامیکی با کاهش هر سه پاسخ مکانیکی همراه است. با افزایش دوز سرامیک از ۰ به ۶ درصد، مقاومت فشاری از حدود ۲۱,۹ به ۲۱,۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد؛ یعنی حدود ۰,۹ مگاپاسکال یا ۴ درصد افت. مقاومت کششی نیز از حدود ۴,۰ به ۳,۴۵ مگاپاسکال کاهش پیدا می‌کند که معادل تقریباً ۰,۵۵

مگاپاسکال یا ۱۴ درصد است، درحالی که مقاومت خمشی از حدود ۷,۸۱ به ۷,۳۷ مگاپاسکال می‌رسد و حدود ۰,۴۴ مگاپاسکال یا ۵,۶ درصد کاهش می‌یابد. در مجموع، ترتیب حساسیت مثبت مخلوط به نوع الیاف به صورت $\text{Forta} > \text{Glass} > \text{Ceramic}$ است. با این حال، این خطوط نتایج یک تحلیل حساسیت خطی و با ثابت فرض کردن سایر متغیرها هستند؛ بنابراین، افزایش پیوسته مقاومت تا دوز ۶ درصد الزاماً به معنای بهینه بودن این مقدار در شرایط واقعی نیست و باید اثر دوز الیاف بر روانی، پراکندگی، تخلخل و قابلیت خودتراکمی نیز بررسی شود.



شکل ۶: تحلیل حساسیت مدل محور دوز فورتا، شیشه و سرامیک بر مقاومت‌های مکانیکی.

۴-۵. مقایسه طرح کنترل و طرح‌های منتخب CSS

نتایج جدول ۳، نشان می‌دهد که طرح CSS تک‌هدفه بیشترین بهبود را در مقاومت فشاری ایجاد کرده است. مقاومت فشاری این طرح از ۱۵,۷۸ مگاپاسکال در نمونه کنترل به ۲۲,۲۹ مگاپاسکال افزایش یافته است؛ یعنی افزایشی برابر با ۶,۵۱ مگاپاسکال یا حدود ۴۱,۳ درصد. مقاومت خمشی نیز از ۷,۰۰ به ۷,۹۷ مگاپاسکال رسیده و حدود ۱۳,۹ درصد بهبود یافته است. با این حال، مقاومت کششی از ۴,۱۱ به ۴,۰۲ مگاپاسکال کاهش جزئی حدود ۲,۲ درصدی داشته است. این طرح شامل ۰,۷۳ درصد فورتا، ۰,۸۸ درصد شیشه و تنها ۰,۰۴ درصد سرامیک با مجموع الیاف ۱,۶۵ درصد است. همچنین، کاهش نسبت آب به سیمان از ۰,۴۰۰ به ۰,۳۸۷، معادل حدود ۳,۳ درصد کاهش، احتمالاً در افزایش مقاومت فشاری آن نقش داشته است. در طرح CSS چندهدفه، بیشترین بهبود مربوط به مقاومت کششی بود؛ به طوری که از ۴,۱۱ به ۵,۰۸ مگاپاسکال افزایش یافت که معادل ۰,۹۷ مگاپاسکال یا حدود ۲۳,۶ درصد است. مقاومت خمشی نیز با افزایش از ۷,۰۰ به ۷,۴۵

مگاپاسکال، حدود ۶,۴ درصد بهبود نشان داد. با این حال، مقاومت فشاری به ۱۱,۳۱ مگاپاسکال کاهش یافت که نسبت به نمونه کنترل حدود ۴,۴۷ مگاپاسکال یا ۲۸,۳ درصد افت را نشان می‌دهد. این طرح دارای ۰,۹۷ درصد فورتا، ۰,۰۶ درصد شیشه و ۱,۴۶ درصد سرامیک است و مجموع الیاف آن به ۲,۴۹ درصد می‌رسد. سهم زیاد الیاف سرامیکی و افزایش نسبت آب به سیمان به ۰,۴۲۵، یعنی حدود ۶,۳ درصد بیشتر از کنترل، می‌تواند با افت قابل توجه مقاومت فشاری این طرح مرتبط باشد. از نظر کارایی، اسلامپ نمونه کنترل ۶۸۰ میلی‌متر بود که در طرح‌های تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب به ۶۵۷ و ۶۶۴ میلی‌متر کاهش یافت؛ بنابراین، افت اسلامپ به ترتیب حدود ۳,۴ و ۲,۴ درصد بود. زمان T500 نیز از ۲,۰۰ ثانیه در نمونه کنترل به ۲,۵۴ ثانیه در طرح تک‌هدفه و ۲,۳۸ ثانیه در طرح چندهدفه افزایش یافت که بیانگر کاهش نسبی سرعت جریان بتن است. در مجموع، طرح CSS تک‌هدفه برای دستیابی به مقاومت فشاری و خمشی بالاتر مناسب‌تر است، در حالی که طرح چندهدفه مقاومت کششی بیشتری ایجاد کرده، اما این مزیت با افت شدید مقاومت فشاری همراه بوده است. بنابراین، در صورت اهمیت هم‌زمان مقاومت و کارایی، طرح تک‌هدفه عملکرد متعادل‌تر و قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد.

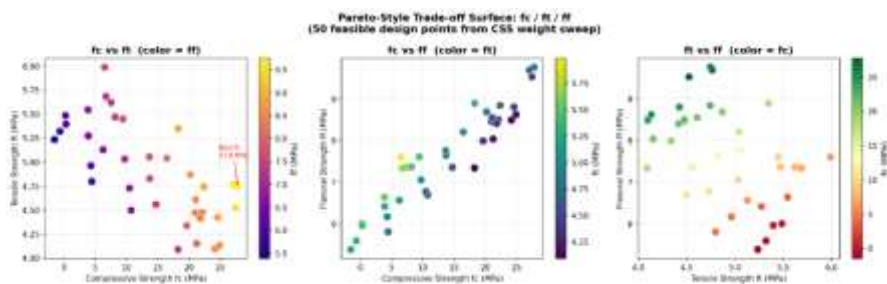
جدول ۳: مقایسه کامل ترکیب و عملکرد طرح کنترل و طرح‌های منتخب CSS

طرح	فورتا %	شیشه %	سرامیک %	W/C	fc	ft	ff	اسلامپ	T500
کنترل	0.00	0.00	0.00	0.400	15.78	4.11	7.00	680	2.00
CSS تک‌هدفه	0.73	0.88	0.04	0.387	22.29	4.02	7.97	657	2.54
CSS چندهدفه	0.97	0.06	1.46	0.425	11.31	5.08	7.45	664	2.38

۶-۴. مصالحه چندهدفه و پایداری جاروب وزنها

نمودار سطح مبادله پارتو در شکل ۷، نشان می‌دهد که افزایش هم‌زمان سه مقاومت فشاری، کششی و خمشی امکان‌پذیر نیست و بهبود هر هدف با کاهش نسبی هدف دیگر همراه است. در نمودار f_c در برابر f_t ، طرح دارای بیشترین مقاومت فشاری با مقدار تقریبی $f_c=27.8$ مگاپاسکال، مقاومت کششی حدود $f_t=4.75$ مگاپاسکال و مقاومت خمشی نزدیک به $ff=9.7$ مگاپاسکال دارد. به طور کلی، طرح‌های دارای مقاومت فشاری بالا در محدوده ۲۰ تا ۲۸ مگاپاسکال، مقاومت کششی تقریباً ۴,۱ تا ۵,۳۵ مگاپاسکال ایجاد

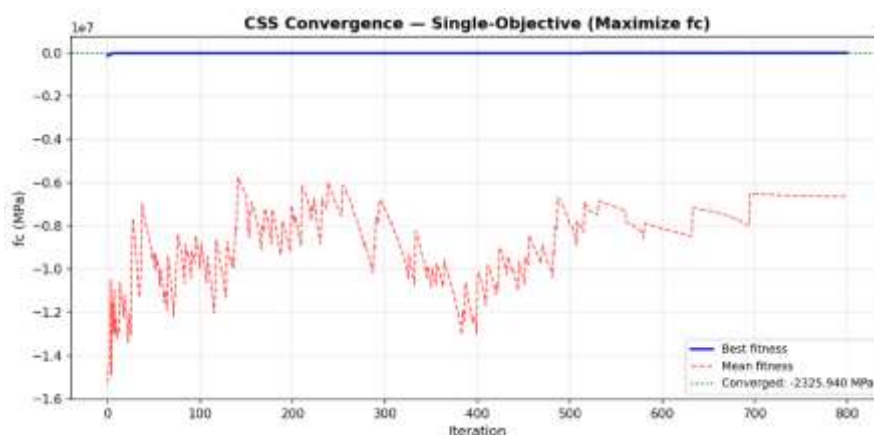
کرده‌اند. در مقابل، بیشترین مقاومت کششی، حدود ۶,۰ مگاپاسکال، در مقاومتی فشاری نزدیک به ۶ تا ۷ مگاپاسکال و مقاومت خمشی حدود ۷,۸ مگاپاسکال حاصل شده است. بنابراین، دستیابی به بیشترین f_t با افت قابل توجه f_c همراه بوده است. نمودار f_c در برابر f_f یک رابطه افزایشی نسبتاً مشخص را نشان می‌دهد؛ به طوری که با افزایش مقاومت فشاری از حدود ۵ به ۲۰ مگاپاسکال، مقاومت خمشی تقریباً از ۶,۰-۶,۶ به ۸,۰-۸,۹ مگاپاسکال افزایش یافته است. بیشترین مقاومت خمشی، حدود ۹,۷ تا ۹,۸ مگاپاسکال، در طرح‌هایی با مقاومت فشاری حدود ۲۷ تا ۲۸ مگاپاسکال مشاهده می‌شود. رنگ این نقاط نشان می‌دهد که مقاومت کششی آن‌ها عمدتاً در محدوده ۴,۷ تا ۴,۹ مگاپاسکال قرار دارد. بنابراین، برخلاف مقاومت کششی، میان مقاومت فشاری و خمشی سازگاری بیشتری وجود دارد و می‌توان هر دو را به طور هم‌زمان در سطح بالایی نگه داشت. نمودار f_t در برابر f_f نیز مبادله میان مقاومت کششی و فشاری را تأیید می‌کند. نقاط با مقاومت فشاری بالا، حدود ۲۰ تا ۲۸ مگاپاسکال، عمدتاً در محدوده f_t برابر ۴,۱ تا ۴,۸ مگاپاسکال و f_f برابر ۸,۳ تا ۹,۸ مگاپاسکال قرار دارند؛ در حالی که طرح‌های دارای f_t بالاتر از ۵,۵ مگاپاسکال معمولاً مقاومت فشاری کمتر از حدود ۱۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی تقریباً ۶,۰ تا ۷,۶ مگاپاسکال دارند. در مجموع، مناسب‌ترین ناحیه مصالحه برای کاربرد سازه‌ای، محدوده تقریبی $f_c=20-28$ ، $f_t=4.4-5.0$ و $f_f=8.4-9.8$ مگاپاسکال است. باین حال، وجود چند مقدار منفی یا نزدیک صفر برای f_c از نظر فیزیکی قابل قبول نیست و نشان می‌دهد که برخی خروجی‌های مدل باید با اعمال قیود مثبت بودن مقاومت و حدود واقعی متغیرهای طرح اختلاط از مجموعه طرح‌های امکان‌پذیر حذف شوند.



شکل ۷: فضای مصالحه کاندیدهای مثبت جاروب وزنها

۷-۴. تشخیص همگرایی الگوریتم

نمودار همگرایی نشان می‌دهد که مقدار بهترین برازندگی در چند تکرار نخست، تقریباً تا تکرارهای ۱۰ تا ۲۰، به سرعت به مقدار نهایی نزدیک شده و سپس تا تکرار ۸۰۰ تقریباً ثابت باقی مانده است. این رفتار در ظاهر بیانگر همگرایی سریع الگوریتم CSS است. با این حال، مقدار میانگین برازندگی جمعیت نوسان بسیار زیادی دارد و تقریباً از 1.5×10^7 - در تکرارهای اولیه تا حدود 1.07×10^6 - تغییر می‌کند. پس از حدود تکرار ۵۰۰، میانگین برازندگی به صورت پله‌ای بهبود یافته و از حدود 8.5×10^6 - به تقریباً 1.06×10^6 - در تکرارهای ۷۰۰ تا ۸۰۰ رسیده است. فاصله بسیار زیاد میان بهترین و میانگین برازندگی نشان می‌دهد که تعداد زیادی از جواب‌های جمعیت احتمالاً نامعتبر بوده یا به دلیل نقض قیود، جریمه‌های بسیار بزرگی دریافت کرده‌اند؛ در حالی که تنها یک یا چند جواب مناسب از مراحل ابتدایی حفظ شده‌اند. با وجود همگرایی ظاهری، مقدار نهایی گزارش شده در نمودار، یعنی $2325,940$ - مگاپاسکال، از نظر فیزیکی برای مقاومت فشاری قابل قبول نیست. براساس نتایج قبلی، مقاومت فشاری طرح CSS تک‌هدفه برابر با $22,29$ مگاپاسکال بود؛ بنابراین، اگر الگوریتم مستقیماً f_c را بیشینه کرده باشد، منحنی باید در حدود $22,29 +$ مگاپاسکال همگرا شود. حتی اگر مسئله بیشینه‌سازی به فرم کمینه‌سازی - f_c تبدیل شده باشد، مقدار نهایی باید تقریباً $22,29$ - باشد، نه $2325,94$ - مگاپاسکال. همچنین، مقادیر منفی چندمیلیونی میانگین جمعیت نشان می‌دهند که محور عمودی در واقع مقاومت فشاری نیست، بلکه احتمالاً ترکیبی از تابع هدف و جریمه قیود است. در این حالت، عنوان محور باید به جای « f_c (MPa) به صورت Penalized fitness یا Objective function value نوشته شود. در مجموع، این شکل برای اثبات پایداری الگوریتم مفید است، اما در وضعیت فعلی نمی‌توان مقدار نهایی آن را به عنوان مقاومت فشاری تفسیر کرد. برای اصلاح نمودار، بهتر است مقدار مقاومت فشاری پیش‌بینی شده بهترین طرح امکان‌پذیر جدا از تابع جریمه ذخیره و رسم شود؛ در این صورت منحنی باید به حدود $22,29$ مگاپاسکال برسد. تابع جریمه نیز می‌تواند در نموداری جداگانه نمایش داده شود. همچنین، دامنه بسیار بزرگ مقادیر منفی نشان می‌دهد که مقیاس ضرایب جریمه باید بررسی شود، زیرا جریمه‌های بسیار سنگین ممکن است تفاوت واقعی میان طرح‌های امکان‌پذیر را پنهان کرده و موجب همگرایی زودرس الگوریتم شوند.



شکل ۸: روند بهترین امتیاز تابع هدف جریمه‌دار در بهینه‌سازی تک‌هدفه CSS

۵. بحث

نتایج پژوهش حاضر از نظر برتری الیاف پلیمری با یافته‌های پیشین همخوانی دارد. در این مطالعه، مخلوط حاوی فورتا در سن ۱۸۰ روز به مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۲۳/۲، ۶/۱۲ و ۱۰/۳۰ مگاپاسکال رسید و در میان سیستم‌های بررسی شده بهترین عملکرد کلی را نشان داد. این نتیجه با یافته‌های Afroughsabet و Ozbakkaloglu و نیز Ferrara و همکاران مطابقت دارد که نقش الیاف پلیمری و هیبریدی را در پل‌زنی ترک‌ها، محدود کردن گسترش ریزترک‌ها و افزایش ظرفیت باربری پس از ترک‌خوردگی تأیید کرده‌اند. با این حال، سیستم سه‌گانه در پژوهش حاضر نتوانست از ترکیب‌های دوتایی حاوی فورتا پیشی بگیرد؛ بنابراین، برخلاف تصور بهبود خودکار عملکرد با افزایش تنوع الیاف، نتایج نشان می‌دهد که اثر هم‌افزایی تنها در صورت انتخاب نسبت مناسب الیاف و حفظ پراکندگی و کارایی مخلوط ایجاد می‌شود. طرح تک‌هدفه CSS مقاومت فشاری را از ۱۵/۷۸ مگاپاسکال در نمونه کنترل به ۲۲/۲۹ مگاپاسکال افزایش داد که معادل ۴۱/۳ درصد بهبود بود. این یافته با مطالعات پیشین درباره اثر مثبت کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده کنترل‌شده از الیاف بر مقاومت SCC سازگار است؛ زیرا در طرح بهینه، نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰۰ به ۰/۳۸۷ کاهش یافت و ترکیب ۰/۷۳ درصد فورتا، ۰/۸۸ درصد شیشه و ۰/۰۴ درصد سرامیک به کار رفت. در مقابل، طرح چندهدفه با وجود افزایش ۲۳/۶ درصدی مقاومت کششی، مقاومت فشاری را ۲۸/۳ درصد نسبت به کنترل کاهش داد. این نتیجه دیدگاه مطرح‌شده در پیشینه را تأیید می‌کند که طراحی بتن خودمتراکم الیافی یک مسئله مصالحه میان مقاومت، مقدار الیاف و کارایی است و بیشینه کردن یک یا چند پاسخ، لزوماً به بهترین طرح اجرایی منجر نمی‌شود. از نظر

مدل‌سازی نیز مقادیر R^2 آزمون برای مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۰/۵۱۴، ۰/۳۷۰ و ۰/۲۴۳ بود که عملکرد متوسط رگرسیون خطی و ضعف بیشتر آن در پیش‌بینی رفتار خمشی را نشان می‌دهد. این دقت در مقایسه با پژوهش‌های Bian، Mai و Khan که از مدل‌های غیرخطی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خواص SCC استفاده کرده‌اند، پایین‌تر است؛ زیرا رفتار بتن الیافی تحت تأثیر برهم‌کنش‌های غیرخطی، جهت‌گیری و پراکندگی الیاف، تخلخل و کیفیت ناحیه انتقال قرار دارد. با این حال، مزیت پژوهش حاضر در استفاده از یک مدل تفسیرپذیر همراه با الگوریتم CSS، بررسی هم‌زمان طرح‌های تک‌هدفه و چندهدفه و تحلیل مصالحه میان مقاومت‌هاست؛ هرچند طرح‌های پیشنهادی باید پیش از کاربرد اجرایی با آزمایش‌های تأییدی اعتبارسنجی شوند.

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بررسی ۲۷۴ نمونه آزمایشگاهی، اثر نوع و مقدار الیاف و سن عمل‌آوری را بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن خودمتراکم ارزیابی و امکان استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار را برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بررسی کرد. نتایج نشان داد که الیاف فورتا در مقایسه با الیاف شیشه و سرامیک، بهترین عملکرد مکانیکی را ایجاد می‌کند. مخلوط حاوی ۵ درصد فورتا در سن ۱۸۰ روز به مقاومت فشاری ۲۳/۲ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۶/۱۲ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۱۰/۳۰ مگاپاسکال رسید. ترکیب‌های فورتا-شیشه و فورتا-سرامیک نیز عملکرد مطلوبی داشتند، اما سیستم سه‌گانه نتوانست برتری مشخصی نسبت به ترکیب‌های دوتایی ایجاد کند. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تعداد یا مقدار انواع الیاف لزوماً به بهبود خواص مکانیکی منجر نمی‌شود و پراکندگی الیاف، تخلخل و حفظ قابلیت خودتراکمی نیز باید در طراحی مخلوط در نظر گرفته شوند. این پژوهش با تحلیل ۲۷۴ نمونه آزمایشگاهی و بهره‌گیری از الگوریتم CSS، طرح اختلاط بهینه برای بتن خودمتراکم الیافی را ارائه داده است.

نتایج نشان می دهد:

۱. الیاف فورتا در دوز ۵٪ با عمل آوری ۱۸۰ روز، بهترین عملکرد چندمعیاره را با پایداری آماری ۶۳,۶٪ در تحلیل بوت استرپ ارائه می دهند.
 ۲. طرح بهینه تک هدفه CSS مقاومت فشاری را ۴۱,۳٪ نسبت به طرح کنترل بدون الیاف بهبود می بخشد و همزمان الزامات کارایی SCC را برآورده می کند.
 ۳. الیاف سرامیکی به دلیل تأثیر منفی بر هر سه مقاومت، نباید به تنهایی در دوزهای بالا در SCC مورد استفاده قرار گیرند.
 ۴. الگوریتم CSS ابزاری کارآمد برای بهینه سازی چندهدفه طرح اختلاط SCC الیافی است که می تواند زمان و هزینه آزمون های آزمایشگاهی را به طور قابل توجهی کاهش دهد.
 ۵. ترکیب هیبریدی فورتا-شیشه گزینه ای متعادل تر با کارایی نزدیک به فورتا تنها و هزینه کمتر است که می تواند در پروژه های عمرانی مقرون به صرفه تر مورد استفاده قرار گیرد.
- پژوهش حاضر با محدودیت هایی از جمله دقت متوسط مدل های رگرسیون خطی، هم خطی شدید میان برخی متغیرهای طرح اختلاط، ثبت نشدن مستقیم عواملی مانند جهت گیری و پراکندگی الیاف، تخلخل و کیفیت ناحیه انتقال الیاف-ماتریس و نیز نبود تأیید آزمایشگاهی مستقل برای همه طرح های پیشنهادی CSS همراه بود؛ بنابراین، خروجی های بهینه سازی باید به عنوان طرح های کاندید و نه طرح های قطعی اجرایی تفسیر شوند. در پژوهش های آینده پیشنهاد می شود طرح های تک هدفه و چندهدفه با ساخت نمونه های جدید و تکرار آزمایش ها اعتبارسنجی شوند و از مدل های غیرخطی مانند Random Forest, XGBoost و شبکه های عصبی، همراه با روش های Ridge, LASSO یا PLS برای کنترل هم خطی استفاده شود. همچنین، بررسی ریزساختار، تخلخل و نحوه توزیع الیاف و وارد کردن شاخص هایی مانند چقرمگی شکست، مقاومت باقی مانده، دوام، هزینه و کربن نهفته در بهینه سازی چندهدفه می تواند به ارائه طرح های اختلاط دقیق تر، پایدارتر و قابل اعتمادتر منجر شود.

منابع:

- حبیبی، م.ر.، و همکاران. (۱۳۹۰). بررسی عملکرد بتن خودمتراکم در شرایط متفاوت محیطی. مجله مهندسی عمران ایران.
- شربتدار، م.ع.، و همکاران. (۱۳۹۶). تأثیر دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر خواص بتن خودمتراکم. نشریه مهندسی سازه و ساخت
- ACI Committee 237. (2007). Self-Consolidating Concrete. American Concrete Institute.
- Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73–82.
- Bian, J., Huo, R., Zhong, Y., & Guo, Z. (2024). XGB-Northern Goshawk Optimization: Predicting the Compressive Strength of Self-Compacting Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28, 1423–1439. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1647->
- EFNARC. (2005). Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- Ferrara, L., Bamonte, P., Caverzan, A., Musa, A., & Sanal, I. (2012). A comprehensive methodology to test the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 37, 406–424.
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). A novel heuristic optimization method: charged system search. *Acta Mechanica*, 213(3–4), 267–289.
- Khan, A. Q., Muhammad, S. G., Raza, A., & Pimanmas, A. (2025). Advanced machine learning techniques for predicting mechanical properties of eco-friendly self-compacting concrete. *Journal of Road Engineering*, 5(2), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.12.002>
- Khan, M. S., Ma, L., Inqiad, W. B., et al. (2025). Predicting residual strength of hybrid fibre-reinforced self-compacting concrete exposed to elevated temperatures using machine learning. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04112. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04112>
- Mai, H.-V. T., Nguyen, M. H., & Ly, H.-B. (2023). Development of machine learning methods to predict the compressive strength of fiber-reinforced self-compacting concrete and sensitivity analysis. *Construction and Building Materials*, 367, 130339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130339>
- Lata, R. (2025). Self-compacting concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15.