



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>




Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

The Effect of Bagasse Ash and Polypropylene Fibers on the Mechanical Performance of Concrete and its Prediction Using Machine Learning*

Research Article

Danial Nasr¹, Rezvan Babagoli² , Nader Dahaghin³

DOI: [10.22067/jfcej.2025.92575.1351](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.92575.1351)

1. Introduction

The energy crisis and shortage of raw materials have forced researchers in this field to think of solutions for the optimal use of energy and raw materials. In the construction industry, one of the most widely used materials is cement, which consumes a lot of energy to produce. One of the ways to save energy in the construction industry is to replace cement with materials such as pozzolans with hydraulic properties and secondary cementitious properties. In addition, the use of pozzolans also improves many of the engineering properties and durability of hardened concrete and saves on the consumption of raw materials such as lime, which is used in large quantities in cement production. The increasing need for cement and its application in different regions, which must have unique properties, and saving energy consumption, necessitates the investigation and research into additives and their replacement with cement.

In the past, natural pozzolan was used in cement and concrete products. Today, mineral additives have also found a special place in the concrete industry, and a part of the concrete or cement materials that are consumed contains natural and synthetic pozzolan. Our country also has a high potential for the production of pozzolanic concrete, with its natural pozzolan resources and the production of synthetic pozzolans. The development of this important industry requires comprehensive cooperation between industries and researchers. The concrete industry depends on Portland cement as a binding material. The production of Portland cement is accompanied by problems such as the consumption of limestone, the consumption of fossil fuels, the relatively high cost of production, the increase in carbon dioxide production, and environmental pollution. In view of these issues, scientists are looking for an alternative to cement to reduce cement consumption and improve the mechanical properties and durability of concrete. These alternative materials include natural and synthetic pozzolans. Many

properties of concrete are improved by the use of pozzolanic materials. Some of these effects are due to physical properties, including particle size and shape, and others are due to chemical interactions of the pozzolan with cement. The behavior of fresh concrete and the degree of hydration of Portland cement can be considered physical properties that depend on the size of the pozzolan particles. The strength and permeability of hardened concrete, resistance to thermal cracking, alkali reaction of the aggregates, and sulfate damage are important properties that result from the chemical interactions of the pozzolan with cement.

2. Research method

In this study, polypropylene fibers with amounts of (0, 1, 3 and 5 percent) and bagasse ash with amounts of (0, 10, 20, 30, 40 and 50 percent) were used to replace the weight percentage of cement and superplasticizer was used at the rate of 2.5 percent of binder (cementitious materials). Also, the strength and durability of green concrete containing the above additives were investigated at the ages of 28 and 90 days. According to the assumptions, a total of 100 samples were made and subjected to compressive strength, flexural strength, water absorption and permeability tests. First, the amount of material used in each design is calculated and measured and then the design development begins. Dry materials; sand and cement are added to the mixer and mixed for 1 minute. Then water is slowly added to the mixer and the materials are mixed for another 4 minutes. Immediately after the work was completed, the slump test was performed and the results were recorded. At all stages, sampling was performed according to the ASTM C31 standard. The concrete molds were first lubricated with appropriate mold oil, and after the concrete was mixed, the concrete was poured into the molds in 3 stages and compacted. To evaluate the mechanical properties and durability of different green concrete designs, after making the concrete and performing tests related to fresh concrete,

* Manuscript received 2025 March 10, Revised 2025 April 6, accepted 2025 May 17.

¹ Corresponding author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran. Email: danielnasr@iau.ac.ir

² Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

³ MSc. Student, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

cubic samples with dimensions of $10 \times 10 \times 10$ cm³ were made to test the compressive strength and water absorption percentage, rectangular samples with dimensions of $50 \times 10 \times 10$ cm³ to test the flexural strength, and cylindrical samples with dimensions of 20×10 cm² to test the permeability. Figure 5 shows the concrete samples after being made in the knowledge-based laboratory and transferred to the laboratory of Isfahan Islamic Azad University.

3. Conclusion

The compressive strength test of the samples after curing under standard conditions was evaluated using a hydraulic jack at a constant speed of 0.3 MPa/s. In general, if polypropylene fibers and bagasse ash are used in green concrete simultaneously, the design (CP3B20), i.e. adding 3% polypropylene fibers and 20% bagasse ash, can have the best performance in terms of compressive strength among the tested designs. The flexural strength test of the samples after curing under standard conditions was evaluated using a hydraulic jack at a constant speed of 0.9 MPa/s. In general, if polypropylene fibers and bagasse ash are used in green concrete simultaneously, the design (CP3B20), i.e. adding 3% polypropylene fibers and 20% bagasse ash, can have the best performance in terms of flexural strength among the tested designs.

To evaluate water absorption, dry weight and wet weight with dry surface (SSD) of the samples were measured. In general, if polypropylene fibers and bagasse ash are used in green concrete simultaneously, the design (CP3B20), i.e. adding 3% polypropylene fibers and 20% bagasse ash, can have the best performance in terms of water absorption among the tested designs.

The test to determine the chloride ion penetration by the (RCPT) method was carried out at the age of 90 days according to the standard. In general, if polypropylene fibers and bagasse ash are used in green concrete simultaneously, the design (CP3B20), i.e. adding 3% polypropylene fibers and 20% bagasse ash, can have the best performance in terms of permeability among the tested designs.



تأثیر خاکستر باگاس و الیاف پلی پروپیلن بر عملکرد مکانیکی بتن و پیش‌بینی آن با یادگیری ماشین*

مقاله پژوهشی

نادر دهاقین^(۳)

رضوان باباگلی^(۲)

دانیال نصر^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.92575.1351

چکیده در این پژوهش از الیاف پلی پروپیلن با مقادیر ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد و خاکستر باگاس با مقادیر ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جایگزین سیمان و از فوق روان کننده به میزان ۲/۵ درصد مواد سیمانی استفاده شد. همچنین مقاومت و دوام بتن حاوی افزودنی‌های فوق در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، این پژوهش به بررسی کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین، شامل *CatBoost*، *LightGBM*، و یک مدل ترکیبی *Ensemble*، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و خمشی بتن مسلح به الیاف و باگاس اختصاص دارد. نتایج به دست آمده نشان داد که در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن به صورت همزمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت فشاری به میزان ۴۱/۷ مگاپاسکال در برابر مقاومت فشاری طرح شاهد به میزان ۳۲ مگاپاسکال، مقاومت خمشی به میزان ۱۴/۹ مگاپاسکال در برابر مقاومت خمشی طرح شاهد به میزان ۵ مگاپاسکال، جذب آب به میزان ۰/۹ درصد در برابر جذب آب طرح شاهد به میزان ۵ درصد و نفوذپذیری به میزان ۳۲۰ کلومب در برابر نفوذپذیری طرح شاهد به میزان ۳۱۴۹ کلومب، در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد. نتایج نشان داد که مدل *Ensemble* با R^2 معادل ۰،۸۵-۰،۹۰ برای مقاومت فشاری و ۰،۹۲ برای مقاومت خمشی، و *RMSE* به ترتیب ۲،۰۰-۱،۵۰ *MPa* و ۱،۱۰-۰،۶۵ *MPa* دقت قابل توجهی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی ملات، ژل میکروسیلیس، پودر سرامیک ضایعاتی، مقاومت مکانیکی، دوام بتن.

Investigating the Strength and Durability of Green Concrete Containing Bagasse Ash and Polypropylene Fibers

Danial Nasr

Rezvan Babagoli

Nader Dahaghin

Abstract Concrete is considered as a composite building material and is widely used in structures, so its mechanical properties and durability are always of interest to civil engineers. Various pozzolanic materials such as microsilica, fly ash and other industrial slags have been used in various researches to improve concrete properties and also reduce cement consumption in order to reduce costs, reduce energy and reduce environmental pollutants caused by cement production. In this research, specifically, from bagasse ash with the aim of reducing the environmental pollution caused by the production of cement through the emission of carbon dioxide gas and from polypropylene fibers with the aim of reducing shrinkage and also controlling deep and surface cracks in The final volume of concrete after hardening was used to improve the mechanical properties and durability of the concrete mixture. For this purpose of the research, polypropylene fibers with amounts (0, 1, 3 and 5%) and bagasse ash with amounts (0, 10, 20, 30, 40 and 50%) replaced the weight percentage of cement and super lubricant to 2.5% binder (cement material) was used. Also, the strength and durability of green concrete containing the above additives at the ages of 28 and 90 days were investigated. According to the assumptions, a total of 100 samples were made and tested for compressive strength, bending strength, water absorption and permeability. The obtained results showed that if polypropylene fibers and bagasse ash are used in green concrete at the same time, the design (CP3B20) i.e. adding 3% polypropylene fibers and 20% bagasse ash can be the best performance. in terms of compressive strength of 41.7 MPa against the compressive strength of the Shahid design of 32 MPa, bending strength of 14.9 MPa against the bending strength of the Shahid design of 5 MPa, water absorption at the rate of 0.9% in It has 5 percent water absorption of the control design and 320 coulomb permeability compared to the control design permeability of 3149 coulombs among the tested designs.

Key words Green Concrete, Polypropylene Fibers, Bagasse Ash, Resistance, Durability.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۲/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

Email: danialnasr@iau.ac.ir

(۲) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

مقدمه

هیدراتاسیون سیمان پرتلند را می‌توان از خواص فیزیکی دانست که به اندازه ذرات پوزولان وابسته است. مقاومت و نفوذپذیری بتن سخت‌شده، مقاومت در مقابل بروز ترک‌خوردگی حرارتی، واکنش قلیایی دانه‌ها و خرابی سولفاتی از خواص مهمی است که از فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان با سیمان ناشی می‌شود [2]. استفاده وسیع از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت‌زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی است. هر چند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد. موضوع دیگری که در سال‌های اخیر ذهن محققان این عرصه را به خود مشغول کرده است، بحث پایایی بتن‌ها در شرایط سخت محیطی می‌باشد. سازه‌های ساخته‌شده با بتن معمولی، عموماً دارای عملکرد مناسبی در شرایط سخت محیطی و عوامل مهاجم نیستند. راهکار پیشنهادی، استفاده از سیمان‌های آمیخته است. امروزه، تولید سیمان‌های آمیخته با استفاده از پوزولان‌های مختلف بسیار گسترش پیدا کرده است. تحقیقات نشان می‌دهند که کارخانه‌های تولید کننده سیمان، مسئول انتشار حدود ۷ درصد از کل دی‌اکسید کربن وارد شده به اتمسفر کره زمین می‌باشند. سیمان‌های آمیخته چندین دهه است که مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جریان تولید سیمان، از مرحله استخراج سنگ آهک از معدن تا مرحله بسته‌بندی، میزان انرژی زیادی مصرف می‌گردد، که با استفاده از سیمان آمیخته می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد و تولید گاز دی‌اکسید کربن را کاهش داد [3].

پوزولان‌ها، مواد سیلیسی یا سیلیسی - آلومیناتی هستند که به خودی خود خاصیت سیمانی (چسبندگی) ندارند ولی پس از آسیاب شدن و وارد شدن به سیمان، در مجاورت رطوبت، با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی می‌دهند و ترکیباتی با مواد سیمانی (ژل سیلیکاتی و...) به وجود می‌آورند. پوزولان‌ها انواع مختلفی دارند و به طور کلی به دو دسته طبیعی و مصنوعی طبقه‌بندی می‌گردند. تمام پوزولان‌های طبیعی غیر از خاک‌های دیاتومه، از سنگ‌ها و کانی‌های آتش‌فشانی سرچشمه گرفته‌اند [4]. بر اساس تحقیقات انجام گرفته‌شده، پوزولان‌ها در آزمایش‌های فشاری دارای رفتار یکسانی هستند؛ به طوری که با اضافه کردن مقداری مشخص از هر پوزولان در مخلوط، حداکثر مقاومت فشاری به دست می‌آید و بعد از آن با افزایش درصد

بحران انرژی و کمبود مواد اولیه، پژوهشگران این عرصه را به اندیشیدن راه‌کارهایی در جهت مصرف بهینه انرژی و مواد اولیه، واداشته است. در صنعت ساختمان، یکی از پرکاربردترین مصالح، سیمان است که انرژی زیادی صرف تولید آن می‌گردد. یکی از راه‌هایی که به صرفه‌جویی در مصرف انرژی در صنعت ساختمان منتهی می‌گردد، جایگزین کردن سیمان با مصالحی نظیر پوزولان-ها با خواص هیدرولیکی و خاصیت سیمانی ثانویه می‌باشد. به علاوه، استفاده از پوزولان‌ها بسیاری از خواص مهندسی و پایایی بتن‌های سخت‌شده را نیز بهبود می‌بخشد و سبب صرفه‌جویی در مصرف مواد اولیه‌ای نظیر آهک نیز می‌شود که در تولید سیمان به مقدار زیادی مورد مصرف است. نیاز روزافزون به سیمان و کاربرد آن در مناطق مختلف که باید دارای خصوصیات منحصر به فردی باشد و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، باعث لزوم بررسی و تحقیق در مواد افزودنی و جایگزینی آن با سیمان می‌شود [1].

در گذشته، پوزولان طبیعی در محصولات سیمانی و بتنی مورد استفاده قرار می‌گرفت. امروزه نیز مواد افزودنی معدنی، جایگاه ویژه‌ای در صنعت بتن پیدا کرده است و بخشی از مواد سیمانی و یا بتنی که به مصرف می‌رسد حاوی پوزولان طبیعی و مصنوعی است. کشور ما نیز با وجود منابع پوزولان طبیعی و همچنین تولید پوزولان‌های مصنوعی، پتانسیل بالایی برای تولید بتن‌های پوزولانی دارد. برای توسعه این صنعت مهم، نیاز به همکاری همه‌جانبه صنایع و پژوهشگران هست. صنعت بتن به سیمان پرتلند به عنوان ماده چسباننده وابسته است. تولید سیمان پرتلند با مشکلاتی همراه است؛ مانند مصرف سنگ آهک، مصرف سوخت‌های فسیلی، هزینه نسبتاً بالای تولید، افزایش تولید دی‌اکسید کربن، آلودگی محیط زیست. با توجه به این موارد، دانشمندان در جستجوی یافتن جایگزینی برای سیمان هستند تا ضمن کاهش مصرف سیمان، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشند. از جمله این مواد جایگزین، پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی هستند. بسیاری از خواص بتن، بر اثر استفاده از مواد پوزولانی بهبود می‌یابد. بعضی از این آثار ناشی از خواص فیزیکی، شامل ریز بودن و شکل ذرات و بقیه ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان با سیمان است. رفتار بتن تازه و درجه

بتن، معایب استفاده از آن در مخلوط بتنی شامل (۱) شکننده بودن، (۲) هادی الکتریکی، (۳) کرنش کم در شکست و (۴) قیمت بالا می‌باشد [5]. از خاکستر باگاس به منظور رفع این مشکلات و کاهش مصرف سیمان در بتن به دلیل اثرات زیست محیطی بسیار مخربی که دارد، استفاده خواهد شد.

باگاس محصول فرعی فرایند تولید شکر از نیشکر است. وقتی ساقه‌های نیشکر خرد می‌شوند، ماده خشک و کاغذی به نام باگاس باقی می‌ماند. البته ماده مشابهی به نام باگاس آگاو وجود دارد که از گیاه آگاو به دست می‌آید. باگاس نیشکر در تولید کاغذ و خمیر کاغذ، مصالح ساختمانی و سوخت استفاده می‌شود. سوختی که سازگار با محیط زیست است و در تولید انرژی، گرما و برق قابل استفاده است. استفاده از ضایعات کشاورزی و صنعتی همچون خاکستر باگاس در بتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، علاوه بر کاهش هزینه‌های بتن و بهبود خواص آن، با هدف کاهش آلودگی محیط زیست در دنیا انجام می‌گیرد [6]. علی‌رغم استفاده‌های زیاد از باگاس در صنعت، مقدار زیادی از آن به صورت ضایعات کشاورزی باقی می‌ماند که علاوه بر آلودگی محیط زیست، هزینه‌های زیادی برای سامان‌دهی به این حجم انبوه باگاس تحمیل می‌شود [7].

بتن یکی از مصالح ساختمانی مرکب و با کاربرد بسیار زیاد در سازه‌ها محسوب می‌شود، لذا خواص مکانیکی و دوام آن همواره مورد توجه مهندسان عمران است. در تحقیقات مختلف برای بهبود خواص بتن و همچنین کاهش مصرف سیمان به منظور کاهش هزینه‌ها، کاهش انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از تولید سیمان، از مواد پوزولانی مختلف مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و دیگر سرباره‌های صنعتی استفاده شده است. در این تحقیق به طور خاص از خاکستر باگاس با هدف کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از تولید سیمان به واسطه انتشار گاز دی‌اکسید کربن و از الیاف پلی‌پروپیلن با هدف کاهش انقباض و همچنین کنترل ترک‌های عمیق و سطحی در حجم نهایی بتن پس از سخت شدن در جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام مخلوط بتنی، استفاده شده است.

همتی و همکاران [1]، در پژوهشی تأثیر طول و ترکیب الیاف بر مقاومت فشاری و خمشی بتن را بررسی کردند. در این مقاله، ۱۵ طرح اختلاط بتن در قالب ۹۰ نمونه مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و ۴۲

پوزولان در مخلوط، مقدار مقاومت افت می‌کند. همچنین پوزولان‌ها می‌توانند آب‌انداختگی، جدایش و تورق در بتن تازه را کاهش دهند و با همگن کردن مخلوط بتن باعث سهولت در پمپ کردن بتن شوند. به علاوه اینکه، پوزولان‌ها می‌توانند با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان ترکیب شوند و احتمال واکنش‌های قلیایی در بتن و یا تشکیل اترینگایت را بسیار کاهش دهند و باعث کاهش نفوذپذیری، بهبود مقاومت و افزایش دوام بتن سخت‌شده مخصوصاً در مقابل واکنش قلیایی-سنگدانه شود. رشد روزافزون صنعت ساخت‌وساز در ایران از یک طرف و نیاز به ساخت بتن‌هایی که بتوانند در مقابل محیط‌های مهاجم و شرایط نسبتاً عادی مقاومت و دوام کافی را دارا باشند از طرف دیگر، باعث می‌شود که جایگزینی پوزولانی همچون خاکستر باگاس به جای بخشی از سیمان، نسبت به پوزولان‌هایی مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی که یا کمیاب بوده و یا دارای هزینه بیشتری هستند، اهمیت پیدا کند. همچنین حضور الیاف در بتن، سبب کاهش انقباض و کنترل ترک‌های عمیق و سطحی در حجم نهایی بتن می‌گردد. لذا استفاده از الیافی همچون پلی‌پروپیلن در بتن می‌تواند سبب بهبود مقاومت، دوام و کارایی آن گردد.

الیاف پلی‌پروپیلن نوعی الیاف تقویتی بتن است. یک ترکیب پلیمری از الیاف‌های پلاستیکی است که به عنوان یک تقویت کننده ثانویه در حجم نهایی بتن استفاده می‌شود. حضور الیاف پلی‌پروپیلن در بتن به کاهش انقباض و همچنین کنترل ترک‌های عمیق و سطحی در حجم نهایی بتن پس از سخت شدن کمک می‌کند. به کارگیری الیاف پلی‌پروپیلن در بتن هیچ تأثیری در نحوه ساختن آن ندارد و باعث تغییر در روش اختلاط مصالح مقدماتی بتن نمی‌شود. کاربرد عمده الیاف پلی‌پروپیلن در بتن، تقویت و مسلح کردن بتن از طریق افزایش مقاومت خمشی، کششی، برشی و سایش در بتن است؛ همچنین این الیاف، جمع‌شدگی ناشی از تنش‌های حرارتی را نیز کاهش می‌دهد و وظیفه کنترل توسعه ترک‌های عرضی را نیز بر عهده دارد. الیاف پلی-پروپیلن به عنوان ترک‌گیر بتن شناخته می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن به شکل مؤثر و کاملاً یکپارچه در حجم کلی بتن توزیع می‌شود و این حضور همگن در سراسر ساختار بتن مانع از گسترش ترک‌ها به واسطه از هم گسیختگی سنگدانه‌ها و ملات سیمان خواهد شد [5].

از طرفی، در کنار مزیت‌های استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در

الیاف پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل در ساختار بتن پلیمری بررسی شد و میزان مقاومت فشاری، خمشی و تنش - کرنش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه SEM، مورد ارزیابی واقع شدند. مطالعه بر روی ۴ گروه بتن پلیمری حاوی رزین اپوکسی ۱۲ درصد، با افزودن الیاف با درصدهای ۰/۵، ۱، ۲ و ۲/۵ نسبت به وزن رزین برای هر دو نوع الیاف پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل، انجام گرفت. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش شامل نمونه ۵۰×۵۰ میلی متر مربوط به آزمایش مقاومت فشاری و تنش - کرنش و نمونه منشوری ۳۰×۵۰ میلی متر مربوط به آزمایش مقاومت خمشی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده، هر چه میزان درصد الیاف پلی پروپیلن در بتن‌های پلیمری افزایش یابد، میزان مقاومت نیز افزایش پیدا می‌کند و روند صعودی را در مقایسه با بتن شاهد از خود نشان می‌دهد؛ اما در مقابل هر چه میزان درصد الیاف پلی وینیل الکل افزایش یابد، مقاومت با روندی نزولی همراه می‌شود. بنابراین از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که درصد بهینه برای پلی وینیل الکل در بتن پلیمری، ۰/۵ درصد وزنی رزین و برای الیاف پلی پروپیلن ۲/۵ درصد می‌باشد. همچنین نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که به طور کلی هر دو الیاف مورد استفاده پس از تحمل بارگذاری کششی، از ماتریس پلیمری جدا نشده و پیوندی قوی با فاز پلیمری برقرار کرده است؛ اما به دلیل پراکندگی مناسب الیاف پلی پروپیلن در بتن پلیمری و بالطبع ایجاد پیوند مطلوب با رزین، خصوصیات مکانیکی بتن به طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد.

ماگلاد و همکاران [8] در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی خواص مهندسی بتن با مقاومت بالای حاوی باگاس نیشکر و خاکستر ساقه ذرت را مورد بررسی قرار دادند. کشورها از مشکلات رشد خاکستر پسماند کشاورزی رنج می‌برند. این مقاله تحقیقاتی استفاده از خاکستر پسماند کشاورزی را به عنوان یک جایگزین جزئی به جای سیمان برای تولید بتن با مقاومت بالا مورد مطالعه قرار می‌دهد. این مقاله همچنین تأثیر استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و خاکستر ساقه ذرت را بر روی خواص بتن با مقاومت بالا بررسی می‌کند. بقایای فرایند احتراق ضایعات کشاورزی به عنوان یک ماده پوزولانی و یک جایگزین جزئی به جای سیمان برای تولید بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرخ جایگزینی جرمی سیمان توسط خاکستر باگاس نیشکر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بود، در حالی که نرخ جرمی سیمان توسط خاکستر ساقه ذرت، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد بود. اثرات خاکستر

نمونه به ابعاد ۱۵×۱۵×۶۰ سانتی متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی ساخته شده است. ۳ طرح اختلاط به عنوان مرجع با ۳ نسبت آب به سیمان (۰/۲۴، ۰/۲۹ و ۰/۳۴) بدون الیاف و با الیاف با ۳ طول مختلف الیاف پلی پروپیلن به ترتیب با طول‌های (۶، ۱۲ و ۱۸) میلی متر ساخته شد. یک طرح اختلاط با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی متر و نیز طرح اختلاطی دیگر با ترکیب الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی متر و الیاف پلی پروپیلن به طول ۱۲ میلی متر مورد بررسی قرار گرفتند. بالاترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌های دارای الیاف ترکیبی با مقاومت ۷۶/۱۶ مگاپاسکال بود که ۱۶/۳ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داشت. نمونه بتن دارای الیاف فلزی با مقاومت خمشی ۱۶/۱ مگاپاسکال، بالاترین مقاومت را در بین تمامی طرح‌های اختلاط بتن این تحقیق دارد و نسبت به نمونه بدون الیاف، ۶۰ درصد افزایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

مختاری و فاطمیان [2] در پژوهشی آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی پروپیلن و میکروسیلیس را بر خصوصیات مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله با هدف بررسی تأثیر به کارگیری میکروسیلیس با درصدهای ۳، ۵ و ۷، الیاف پلی پروپیلن با درصدهای ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ و نیز مخلوط همزمان این دو افزودنی بر روی مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن، ۴۰ نمونه آزمایشگاهی ساخته شد. نتایج نشان داد که در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه، نمونه‌های دارای میکروسیلیس افزایش ۳۷ درصدی، نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن افزایش ۱۷ درصدی و نمونه‌های دارای مخلوط همزمان میکروسیلیس و الیاف پلی پروپیلن، افزایش ۲۶ درصدی نسبت به نمونه مرجع داشتند. همچنین در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه، نمونه‌های دارای مخلوط میکروسیلیس و الیاف پلی پروپیلن به ترتیب افزایش ۸ درصدی و ۶ درصدی نسبت به نمونه مرجع داشتند. در آزمایش مقاومت کششی، تمامی نمونه‌های ۷ روزه دارای مقاومت پایین‌تری در حدود ۹ درصد نسبت به نمونه مرجع بودند؛ در حالی که در نمونه‌های ۲۸ روزه شامل ۳ درصد میکروسیلیس و ۰/۰۴ درصد پلی پروپیلن، مقاومت کششی به میزان ۵ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داشت. در نمونه‌های ۹۰ روزه نیز به طور میانگین افزایش ۸ درصدی مقاومت کششی حاصل گردید.

موسوی و جواهری [3] در پژوهشی به بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن بر پایه رزین اپوکسی پرداختند. در این پژوهش تأثیر

فولادی قلاب‌دار و الیاف شیشه در جایگزینی بهینه خاکستر باگاس در بتن پرداخته شده است. نمونه‌های بتن خاکستر باگاس برای عیار M30 با درصد جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ریخته‌گری شدند. نتایج آزمایش نشان داده است که خواص مکانیکی تا ۱۰ درصد جایگزینی BA بهبود یافته و در نتیجه شروع به کاهش کرده است. افزایش بهینه مقاومت کششی، خمشی، فشاری و شکافی به ترتیب ۶/۵، ۱۳/۰۹ و ۸/۱۳ درصد برای نمونه BA10 پس از ۲۸ روز تعیین شد. با افزودن الیاف فولادی قلاب‌دار، استحکام بهینه برای نمونه BASF-C با افزایش مقاومت کششی، خمشی، فشاری و شکافی به ترتیب ۸/۸۹، ۱۸/۴۴ و ۱۸/۸ درصد به دست می‌آید. با این حال، حداکثر استحکام با الیاف شیشه برای BAGF-C با افزایش مقاومت کششی، خمشی، فشاری و شکافی به ترتیب ۸/۱۲، ۱۴/۲۹ و ۱۰/۰۳ درصد به دست آمد. کارایی با افزایش نسبت خاکستر باگاس در مخلوط کاهش یافت. بتن خاکستر باگاس را می‌توان با نسبت بهینه ۱ درصد الیاف فولادی یا ۱/۵ درصد الیاف شیشه در جایگزینی ۱۰ درصد خاکستر باگاس توسعه داد.

دیهان و همکاران [11] در پژوهشی به ارزیابی خواص مکانیکی بتن تولید شده با خاکستر بادی، خاکستر باگاس و الیاف موز پرداختند. بتن به دلیل خواص مقاومتی و همچنین دوامش، پویاترین ماده مهندسی در صنعت ساختمان است. مصرف مواد خام نه تنها منابع طبیعی را تحلیل می‌برد، بلکه باعث افزایش مواد سمی در محیط زیست توسط صنایع ساختمانی می‌شود. محصولات جایگزین تا حدودی محیط زیست و منابع طبیعی را نجات می‌دهند. در همین زمینه، برخی از ترکیبات معمول مخلوط بتن با ضایعات صنعتی / طبیعی مانند خاکستر بادی، خاکستر باگاس نیشکر و الیاف موز جایگزین می‌شود. نمونه‌ها با ترکیبات مختلف با استفاده از درصد جایگزینی متفاوت سیمان و ماسه تهیه شدند. بنابراین، مخلوط بتن با استفاده از خاکستر بادی (جایگزینی ۲۰ درصد سیمان) و جایگزینی جزئی ماسه با ضایعات صنعتی یعنی خاکستر باگاس نیشکر (جایگزینی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد ماسه) با افزودن الیاف موز (۰، ۲/۵ و ۵ درصد) ایجاد می‌شود. نمونه‌ها با مخلوط بتن استاندارد تحت مقاومت فشاری مشخصه و مقاومت خمشی ارزیابی و مقایسه شدند. جایگزینی جزئی با ۱۰ درصد خاکستر باگاس بهترین ترکیب است که خواص مکانیکی بهتری را به همراه دارد.

با توجه به بیان مسئله و پیشینه تحقیق حاضر، تحقیقات گسترده‌ای در جهت تولید بتن دوست‌دار محیط زیست (بتن سبز)

تفاله نیشکر و خاکستر ساقه ذرت بر کارایی، استحکام فشاری، استحکام کششی شکافی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بر خواص بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، اثرات خاکستر تفاله نیشکر و خاکستر ساقه ذرت بر مقاومت به نفوذ یون کلرید و جذب آب و نفوذپذیری در بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نتایج چشم‌گیری را نشان داد؛ یعنی تولید بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا با مقاومت فشاری و خمشی مربوطه بیش از ۲۰۵ و ۲۷ مگاپاسکال، زمانی امکان‌پذیر است که جایگزینی ۲۴ درصد جرم سیمان توسط خاکستر پسماند کشاورزی (۴ درصد ذرت و ۲۰ درصد باگاس) در سن تست ۲۸ روزه انجام شود. کمترین نفوذپذیری با جایگزینی ۳۸ درصد جرم سیمان توسط خاکستر پسماند کشاورزی (۸ درصد ذرت و ۳۰ درصد باگاس) به ترتیب ۱۴۰ کلومب و ۰/۹۵ سانتی‌متر بر ثانیه برای نفوذپذیری کلرید و آب به دست می‌آید.

اکبر و همکاران [9]، در پژوهشی ملات ژئوپلیمری مهندسی شده مبتنی بر خاکستر باگاس نیشکر حاوی الیاف پروپیلن را مورد بررسی قرار دادند. اخیراً تولید ژئوپلیمر سبک وزن از ضایعات، مورد توجه جدی برای ساخت و ساز ساختمان‌های پایدار و سبز قرار گرفته است؛ اما خمش کمتر و استحکام کششی کاربرد گسترده‌تر آن را در صنعت ساختمان محدود می‌کند. این مطالعه به منظور تهیه خاکستر باگاس نیشکر مبتنی بر ژئوپلیمر تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن انجام شد. خواص فیزیکی و مکانیکی ژئوپلیمرها با درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن از طریق آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن منجر به افزایش استحکام خمشی و کششی شد. نتایج نشان می‌دهد که محدود کردن محتوای الیاف پلی‌پروپیلن به ۱ درصد، نه تنها خواص خمشی را بهبود می‌بخشد، بلکه با ارائه ریزساختار متراکم‌تر، مقاومت فشاری را نیز افزایش می‌دهد. این مطالعه نتیجه‌گیری می‌کند که استفاده از کامپوزیت خاکستر باگاس تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند راه‌حالی جایگزین برای دستیابی به پایداری با استفاده از زباله‌هایی که عمدتاً باعث تخریب محیط زیست در طول دفن زباله می‌شوند، فراهم کند.

کومار و گوپتا [10] در پژوهشی به بررسی اثر خاکستر باگاس، الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی بتن پرداختند. در کار حاضر به بررسی خواص مکانیکی بتن در اثر جایگزینی جزئی سیمان با خاکستر باگاس و گنجاندن الیاف

مصالح و روش تحقیق

شن

شن مورد استفاده در این تحقیق از نوع شکسته است و در ساخت مخلوط از ۲ تیپ سنگدانه ۵-۱۲ و ۱۲-۱۹ استفاده شده است. در جدول (۱) و شکل (۱)، مشخصات سنگدانه‌ها و منحنی دانه‌بندی شن آورده شده است.

ماسه

ماسه مورد استفاده در این تحقیق از نوع شکسته، دارای حداکثر اندازه ۵ میلی‌متر و میزان جذب آب ۱/۱۵ درصد می‌باشد که در جدول (۲) و شکل (۲) دانه‌بندی ماسه و منحنی دانه‌بندی ماسه آورده شده است.

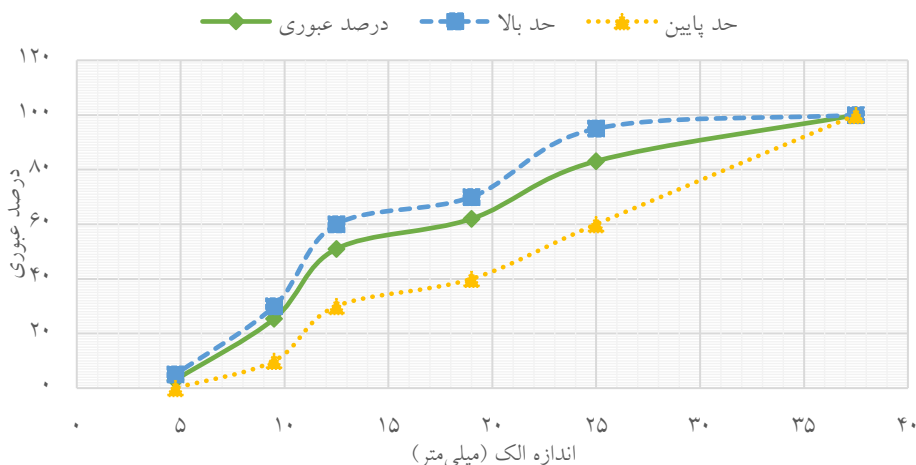
سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ از کارخانه سیمان اردستان می‌باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است.

صورت گرفته است. در این تحقیقات از موادی همچون سرباره کوره آهن‌گدازی، دوده سیلیس، میکروسیلیس، خاکستر باگاس، الیاف فولاد، الیاف کربن، الیاف شیشه، الیاف پلی پروپیلن و... استفاده شده است، اما به طور خاص بررسی اثر استفاده همزمان از الیاف پلی پروپیلن به منظور کنترل ترک‌های سطحی و عمقی بتن و همچنین خاکستر باگاس به منظور کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از تولید سیمان صورت پذیرفته است لذا در پژوهش حاضر به این مهم پرداخته شده است. بنابراین، با وجود پتانسیل بالای پوزولان‌ها مانند خاکستر باگاس و الیاف پلی پروپیلن در کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان و بهبود خواص مکانیکی بتن [1,12]، بهینه‌سازی ترکیب‌ها و پیش‌بینی دقیق خواص همچنان چالش‌برانگیز است. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین (CatBoost، Ensemble و LightGBM) به تحلیل داده‌های مقاومت فشاری و خمشی می‌پردازد تا رویکردی داده‌محور برای طراحی بتن سبز ارائه دهد. هدف، توسعه مدلهایی با دقت بالا برای پیش‌بینی رفتار بتن مسلح به فیبر و باگاس در شرایط مختلف پخت (۲۸ و ۹۰ روز) است.

جدول ۱ مشخصات سنگدانه‌ها

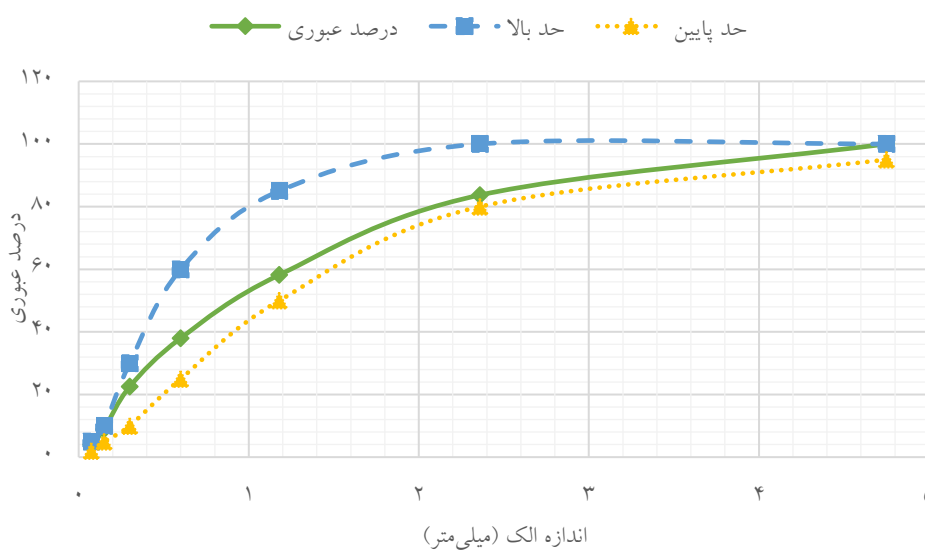
قطر الک	درصد عبوری	حد بالا	حد پایین	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص واقعی
۳۷/۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱/۵۵	۲/۸۰
۲۵	۸۳/۱۰	۹۵	۶۰		
۱۹	۶۲	۷۰	۴۰		
۱۲/۵۰	۵۱	۶۰	۳۰		
۹/۵۰	۲۵/۴۰	۳۰	۱۰		
۴/۷۵	۳	۵	۰		



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی شن

جدول ۲ دانه‌بندی ماسه

قطر الک	درصد عبوری	حد بالا	حد پایین	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص واقعی
۴/۷۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۲/۷۱	۲/۶۳
۲/۳۶	۸۳/۷۰	۱۰۰	۸۰		
۱/۱۸	۵۸/۲۰	۸۵	۵۰		
۰/۶۰	۳۸	۶۰	۲۵		
۰/۳۰	۲۲/۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۱۵	۹	۱۰	۵		
۰/۰۷۵	۴	۵	۲		



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۳ مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ اردستان (ISIRI 389)

پارامتر شیمیایی	مقدار
SiO ₂	۲۲/۰۰ ± ۰/۴۰
Al ₂ O ₃	۵/۰۰ ± ۰/۳۰
Fe ₂ O ₃	۳/۸۲ ± ۰/۲۰
CaO	۶۴/۰۰ ± ۰/۵۰
MgO	۱/۹۰ ± ۰/۲۰
SO ₃	۱/۵۰ ± ۰/۲۰
K ₂ O	۰/۴۹ ± ۰/۲۰
Na ₂ O	۰/۲۵ ± ۰/۱۵
Cl	۰/۰۱۹ ± ۰/۰۰۱
L.O.I	۱/۰۰ ± ۰/۲۰
L.S.F	۹۱/۰۰ ± ۱/۰۰
C ₃ A	۶/۵۰ ± ۱/۰۰
CaO Free	۱/۲۰ ± ۰/۲۰

جدول ۴ مشخصات فیزیکی سیمان تیپ ۲ اردستان (ISIRI 389)

انبساط اتوکلاو (%)	مقاومت فشاری (Kg/Cm ²)			گیرش نهایی (دقیقه)	گیرش اولیه (دقیقه)	بلین (Cm ² /gr)	پارامتر فیزیکی مقدار
	۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه				
۰/۱۴±	≥۳۷۰	≥۲۷۵	≥۱۷۰	۱۵۰±۱۰	۹۵±۵	۳۰۰۰±۵۰	

نظر ظاهری شبیه تراشه‌های ریز چوب است. رنگ باگاس تازه زرد مایل به سفید است ولی پس از خشک شدن به زرد متمایل به قهوه‌ای می‌گراید. باگاس بوی مخصوص به خود را دارد که شبیه به بوی ملاس تخمیر شده است. میزان عناصر موجود در آن متفاوت است و بستگی به گونه‌های مختلف نیشکر، رشد سنی نیشکر، نحوه برداشت آن و بالاخره میزان بازیابی و راندمان عصاره‌گیری در آسیاب‌ها دارد [13].

در تحقیق حاضر، افزودنی باگاس مصرفی در ۲ حالت خشک سوخته نشده و خشک خاکستر شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ نمونه افزودنی باگاس مصرفی (خشک سوخته نشده و خشک خاکستر شده)

الیاف پلی پروپیلن

مشخصات فیزیکی، مکانیکی و نمونه الیاف مصرفی در تحقیق حاضر در جدول (۵) و شکل (۳) آورده شده است. مشخصات فیزیکی ژل میکروسیلیس الیاف‌دار در جدول (۵) آمده است. شکل (۲) ژل میکروسیلیس مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

وزن مخصوص	رنگ	ضخامت	طول	جنس	پارامتر فیزیکی
۰/۹۱ (gr/Cm ³)	سفید	۳ تا ۶ (Denier)	۱۸ تا ۶ (mm)	PP (پلی پروپیلن)	مقدار
دمای ذوب		میزان ازدیاد طول		مقاومت کششی	
۱۶۵ °C		۸۰ درصد		۴۰۰ (MPa)	



شکل ۳ نمونه الیاف پلی پروپیلن مصرفی

خاکستر باگاس

باگاس دارای ۴۹ درصد رطوبت، ۴۸ درصد فیبر و ۲/۳۰ درصد قند است. این مقدار قند بسیار مهم است چرا که باعث می‌شود پروسه تخمیر به راحتی آغاز شود. قدرت جذب آب باگاس بسیار بالاست. نیتروژن باگاس کم و تقریباً برابر ۰/۱۷ درصد است. از

کاهش می‌دهد یا میزان اسلامپ یا جریان روانی را افزایش می‌دهد. از خواص دیگر فوق روان کننده بتن در ایجاد خاصیت دیرگیری یا گیرش بتن و تغییر حالت بتن از حالت خمیری به سخت می‌توان تعریف کرد.

طرح اختلاط

در این پژوهش از الیاف پلی‌پروپیلن با مقادیر ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد و خاکستر باگاس با مقادیر ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جایگزین درصد وزنی سیمان و از فوق روان کننده به میزان ۲/۵ درصد بایندر (مواد سیمانی) استفاده شده است. همچنین مقاومت دوام بتن سبز حاوی افزودنی‌های فوق در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به مفروضات، در کل تعداد ۱۰۰ عدد نمونه ساخته شد و مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب و نفوذپذیری قرار گرفت.

در جدول (۶) طرح اختلاط بتن سبز حاوی الیاف پلی-پروپیلن و خاکستر باگاس به همراه طرح شاهد آورده شده است.

جدول ۶ طرح اختلاط

طرح	آب kg/m ³	سیمان kg/m ³	ماسه kg/m ³	شن kg/m ³	الیاف پلی‌پروپیلن (%)	الیاف پلی‌پروپیلن kg/m ³	نسبت آب به مواد سیمانی	خاکستر باگاس (%) kg/m ³	فوق روان کننده (%)
شاهد	۲۲۰/۵	۴۹۰	۸۷۷	۹۵۲	۰	۰	0/45	۰	۲
CP ₁ B ₁₀	۲۲۰/۵	۴۳۶/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	0/45	۴۹ (۱۰٪)	۲
CP ₃ B ₁₀	۲۲۰/۵	۴۲۶/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	0/46	۴۹ (۱۰٪)	۲
CP ₅ B ₁₀	۲۲۰/۵	۴۱۶/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	0/47	۴۹ (۱۰٪)	۲
CP ₁ B ₂₀	۲۲۰/۵	۳۸۷/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	0/45	۹۸ (۲۰٪)	۲
CP ₃ B ₂₀	۲۲۰/۵	۳۷۷/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	0/46	۹۸ (۲۰٪)	۲
CP ₅ B ₂₀	۲۲۰/۵	۳۶۷/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	0/47	۹۸ (۲۰٪)	۲
CP ₁ B ₃₀	۲۲۰/۵	۳۳۸/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	0/45	۱۴۷ (۳۰٪)	۲
CP ₃ B ₃₀	۲۲۰/۵	۳۲۸/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	0/46	۱۴۷ (۳۰٪)	۲
CP ₅ B ₃₀	۲۲۰/۵	۳۱۸/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	0/47	۱۴۷ (۳۰٪)	۲
CP ₁ B ₄₀	۲۲۰/۵	۲۸۹/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	0/45	۱۹۶ (۴۰٪)	۲
CP ₃ B ₄₀	۲۲۰/۵	۲۷۹/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	0/46	۱۹۶ (۴۰٪)	۲
CP ₅ B ₄₀	۲۲۰/۵	۲۶۹/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	0/47	۱۹۶ (۴۰٪)	۲
CP ₁ B ₅₀	۲۲۰/۵	۲۴۰/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	0/45	۲۴۵ (۵۰٪)	۲
CP ₃ B ₅₀	۲۲۰/۵	۲۳۰/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	0/46	۲۴۵ (۵۰٪)	۲
CP ₅ B ₅₀	۲۲۰/۵	۲۲۰/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	0/47	۲۴۵ (۵۰٪)	۲

عمل آوری نمونه‌ها

پس از ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز شدند و نمونه‌ها شماره‌گذاری شدند. نمونه‌ها در مخازن تصفیه آب آهک‌دار قرار گرفتند و تا زمان آزمایش (۲۸ و ۹۰ روز) پردازش شدند. پس از پردازش، نمونه‌ها از آب خارج شدند و سطح خارجی آن‌ها خشک شد. در نهایت، نمونه‌ها برای انجام تست‌های مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برنامه آزمایشگاهی

کارایی (اسلامپ)

پس از ساخت هر طرح، اسلامپ آن اندازه‌گیری شد و در صورت مطلوب بودن، برای انجام تست‌های مقاومت فشاری، خمشی، جذب آب و نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به جدول (۶) طرح اختلاط، طرح‌های CP3B30، CP5B30، CP3B40، CP5B40، CP3B50 و CP5B50 به دلیل نداشتن کارایی مناسب مورد آزمایش قرار نگرفتند.

مقاومت فشاری و خمشی

به منظور انجام آزمایش‌ها مقاومت فشاری و خمشی مطابق با استاندارد ASTM C39 نمونه‌ها پس از ساخت و عمل‌آوری به مدت ۲۸ و ۹۰ روز در حوضچه آب آهک‌دار قرار می‌گیرند. بر این اساس در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن سبز حاوی الیاف پلی-پروپیلن و خاکستر باگاس با استفاده از جک هیدرولیکی نشان داده شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا مقدار ماده مورد استفاده در هر طرح محاسبه و اندازه‌گیری می‌شود و سپس توسعه طرح آغاز می‌گردد. مواد خشک، ماسه و سیمان به مخلوط‌کن اضافه می‌گردد و به مدت ۱ دقیقه با هم مخلوط می‌شوند. سپس آب به آرامی به مخلوط‌کن اضافه می‌شود و ۴ دقیقه دیگر مواد مخلوط می‌گردند. بلافاصله پس از اتمام کار، تست اسلامپ انجام می‌شود و نتایج ثبت می‌گردد. در تمامی مراحل، نمونه‌گیری بر اساس استاندارد ASTM C31 انجام می‌شود. قالب‌های بتنی ابتدا با روغن قالب مناسب روغن‌کاری می‌شوند و پس از اتمام اختلاط بتن، بتن در ۳ مرحله در قالب‌ها ریخته و متراکم می‌گردد.

برای ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوام طرح‌های مختلف بتن سبز، پس از ساخت بتن و انجام آزمایش‌های مرتبط با بتن تازه، نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مکعب جهت آزمایش مقاومت فشاری و درصد جذب آب، نمونه‌هایی با ابعاد مستطیلی $10 \times 10 \times 50$ سانتی‌متر مکعبی برای آزمایش مقاومت خمشی و نمونه‌هایی با ابعاد استوانه‌ای 10×20 سانتی‌متر مربعی برای آزمایش نفوذپذیری، ساخته شدند. در شکل (۵) نمونه‌های بتنی پس از ساخت در آزمایشگاه دانش‌بنیان و انتقال به آزمایشگاه دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان نشان داده شده است.



شکل ۵ نمونه‌های بتنی پس از ساخت



شکل ۶ آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبز حاوی الیاف پلی-

پروپیلن و خاکستر باگاس با استفاده از جک هیدرولیکی

مکعبی پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری، پس از خروج از حوضچه، آماده آزمایش هستند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آن در دمای 10.5 ± 5 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از خارج شدن از آن و سرد شدن، نمونه‌ها وزن شدند و در آب آهک‌دار قرار گرفتند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از آب خارج شدند و روی سطح خشک وزن شدند.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش و تفاضل‌های وزن خشک و مرطوب، درصد جذب آب نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

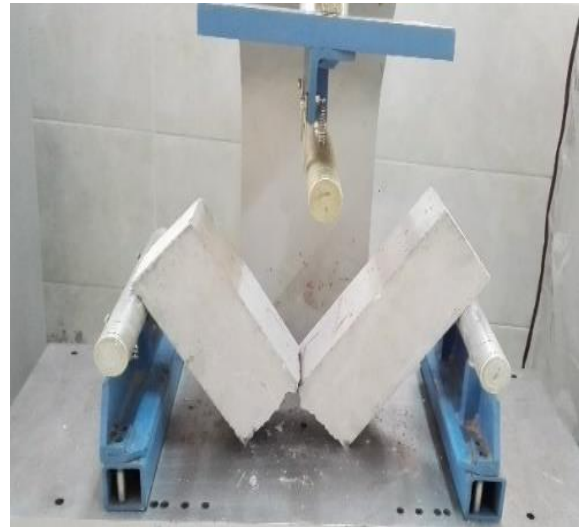
m : وزن نمونه مرطوب

m_0 : وزن نمونه خشک

نفوذپذیری (RCPT)

نفوذپذیری طبق استاندارد ASTM C1202 انجام شد. در این روش میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع به قطر ۱۰ و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در طول ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت، اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار گرفتند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه‌ها عبور کردند و یون‌ها به درون بتن رانده شدند.

در این تحقیق آزمایش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. برای هر طرح اختلاط، ۲ عدد نمونه استوانه‌ای به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر از نمونه‌های بتنی 10×20 سانتی‌متری برش داده شد. بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها درون سلول‌های آزمایش قرار داده شدند. در انتها، جریان ثابتی با اعمال ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه‌ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها به دست آمد. بر اساس جدول (۷) می‌توان مقاومت بتن در برابر نفوذپذیری کلرید را تعیین کرد. در شکل (۸) دستگاه آزمایش نفوذپذیری نشان داده شده است.



شکل ۷ آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتن سبز حاوی الیاف پلی- پروپیلن و خاکستر باگاس با استفاده از جک هیدرولیکی

جذب آب

جذب آب یکی از ویژگی‌های یک مخلوط است و ویژگی‌های ریزساختار آن را از نظر حفره‌ها و پیوستگی مشخص می‌کند. طبق استاندارد ASTM C642، جذب آب طولانی مدت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمایش ارتباط مستقیمی با منافذ موجود در مخلوط دارد، بنابراین هر چه تعداد منافذ بیشتر باشد، آب بیشتری نفوذ خواهد کرد. برای انجام این آزمایش نمونه‌های

جدول ۷ تفسیر نفوذپذیری (RCPT)

بار الکتریکی عبور کرده (کلومب)	۴۰۰۰ <	۲۰۰۰-۴۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰ <
نفوذپذیری یون کلرید	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	قابل اغماض



شکل ۸ آزمایش نفوذپذیری (RCPT)

$$y = \sum_{k=1}^K T_k(x; \theta_k) \quad (۲)$$

مدل LightGBM

مدل LightGBM یک الگوریتم بوستینگ مبتنی بر درخت با کارایی بالا، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات به کار گرفته شد که بر سرعت پردازش و دقت $R^2 \approx 0.97$ تأکید دارد. در این مدل با استفاده از روش رشد برگ‌محور (leaf-wise) و تنظیم پارامترهایی نظیر تعداد برگ‌ها (num_leaves)، عمق بیشینه (max_depth) و حداقل نمونه‌های هر برگ (min_child_samples)، به تحلیل داده‌ها پرداخته شد. بهینه‌سازی با Optuna و اعتبارسنجی متقاطع انجام شد تا از تعمیم‌پذیری مدل اطمینان حاصل شود. رابطه پیش‌بینی به صورت زیر است:

$$y = \sum_{m=1}^M \eta \cdot h_m(x) \quad (۳)$$

که در آن T_k نشان دهنده درخت تصمیم‌گیری k ام، θ_k پارامترهای مربوطه و $x=[M,C,t]$ بردار ویژگی‌هاست. این مدل با کاهش بیش‌برازش (overfitting) از طریق تنظیم پارامترهایی مانند L2 regularization توانست اثرات مثبت ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک را به خوبی پیش‌بینی کند.

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد

مدل CatBoost

مدل CatBoost به عنوان یک الگوریتم مبتنی بر گرادینت بوستینگ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات حاوی ژل میکروسیلیس (M)، پودر سرامیک ضایعاتی (C) و زمان عمل‌آوری (t) استفاده شد. این مدل با توانایی مدیریت داده‌های عددی و تعاملات غیرخطی بین متغیرها، به طور خاص برای داده‌های محدود آزمایشگاهی مناسب است. بهینه‌سازی پارامترها شامل تعداد تکرارها (iterations)، نرخ یادگیری (learning_rate) و عمق درخت‌ها (depth) با استفاده از Optuna انجام شد و با دقت بالایی ($R^2 \approx 0.98$) به دست آمد. تابع پیش‌بینی به صورت مجموع خروجی درخت‌های تصمیم‌گیری تعریف می‌شود:

که در آن T_k نشان دهنده درخت تصمیم‌گیری k ام، θ_k پارامترهای مربوطه و $x=[M,C,t]$ بردار ویژگی‌هاست. این مدل با کاهش بیش‌برازش (overfitting) از طریق تنظیم پارامترهایی مانند L2 regularization توانست اثرات مثبت ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک را به خوبی پیش‌بینی کند.

نتایج و تحلیل آزمایش‌ها مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل‌های (۹) تا (۱۱) آمده است.

با توجه به شکل‌های (۹) تا (۱۱) که تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبب حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای بالاترین مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب برابر ۳۸/۱، ۴۱/۷ و ۳۹/۵ مگاپاسکال بوده‌اند. مقاومت فشاری طرح شاهد ۳۲ مگاپاسکال بوده است.

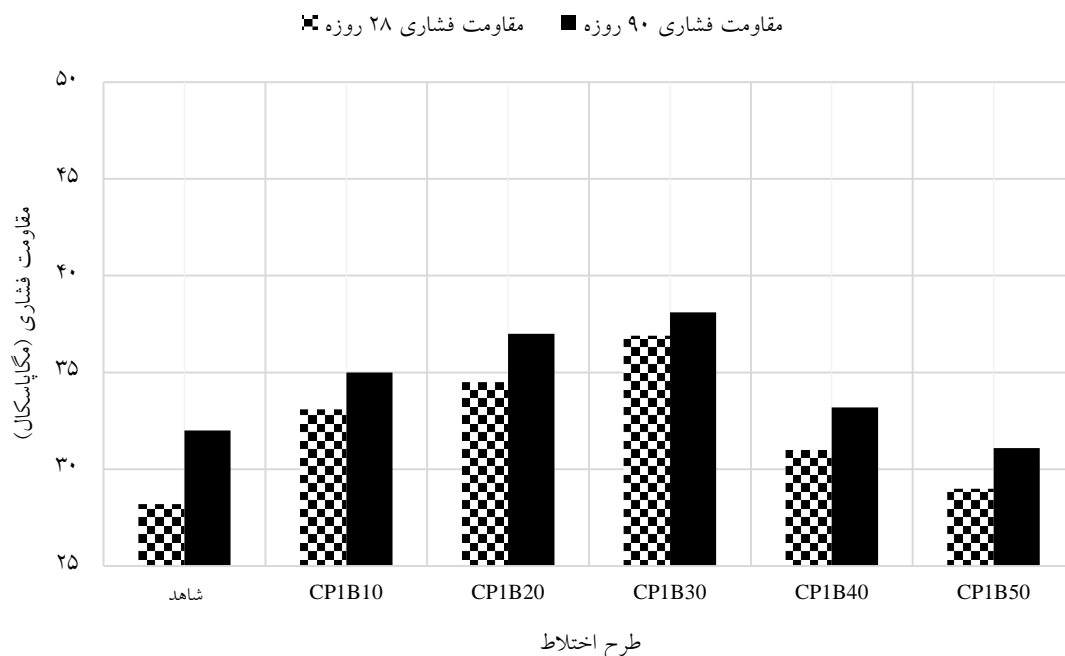
عمل‌آوری تأثیر غالب‌تری نسبت به درصد مواد دارد و برای کاربردهای عملی در بهینه‌سازی ملات بسیار مناسب است.

مدل ترکیبی (VotingRegressor)

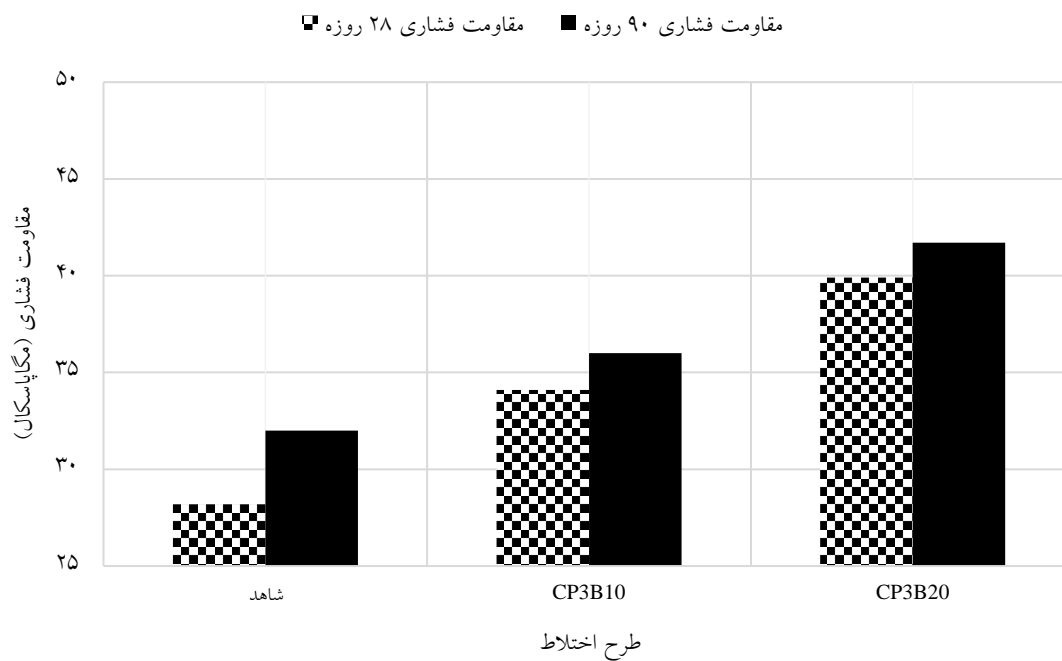
مدل ترکیبی VotingRegressor با هدف بهبود دقت پیش‌بینی مقاومت فشاری از طریق ترکیب وزن‌دار مدل‌های CatBoost (وزن ۰,۶) و LightGBM (وزن ۰,۴) طراحی شد و بهترین عملکرد را با $R^2 \approx 0.99$ ، $R^2 \approx 0.99$ ارائه داد. این رویکرد با بهره‌گیری از نقاط قوت هر دو مدل، خطاها را کاهش داد و پایداری پیش‌بینی‌ها را افزایش داد. داده‌های آموزشی شامل درصد ژل میکروسیلیس، پودر سرامیک و زمان عمل‌آوری بودند که پس از استانداردسازی وارد مدل شدند. تابع پیش‌بینی ترکیبی به صورت میانگین وزن‌دار تعریف می‌شود:

$$Y_{ensemble} = \omega_1 \cdot Y_{CatBoost} + \omega_2 \cdot Y_{LightGBM} \quad (4)$$

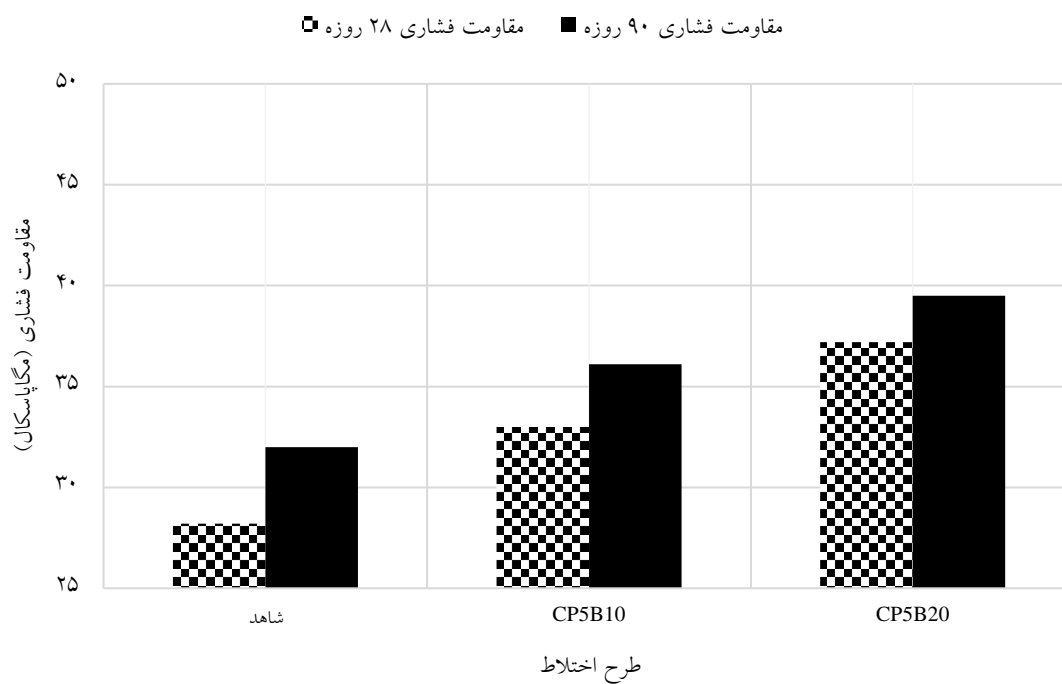
که $w_1=0.6$ و $w_2=0.4$ وزن‌ها و $Y_{LightGBM}$ ، $Y_{CatBoost}$ پیش‌بینی‌های مدل‌های پایه هستند. این مدل با تأیید ترکیب بهینه (۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک) ابزاری قدرتمند برای طراحی ملات‌های پایدار فراهم کرد.



شکل ۹ تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبب حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۱۰ تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن



شکل ۱۱ تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن

درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن دارای بالاترین مقادیر مقاومت خمشی به ترتیب برابر ۱۳/۱، ۱۴/۹ و ۱۳/۸ مگاپاسکال بوده‌اند. مقاومت خمشی طرح شاهد ۵ مگاپاسکال بوده است.

در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح (CP₃B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت خمشی در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

جذب آب

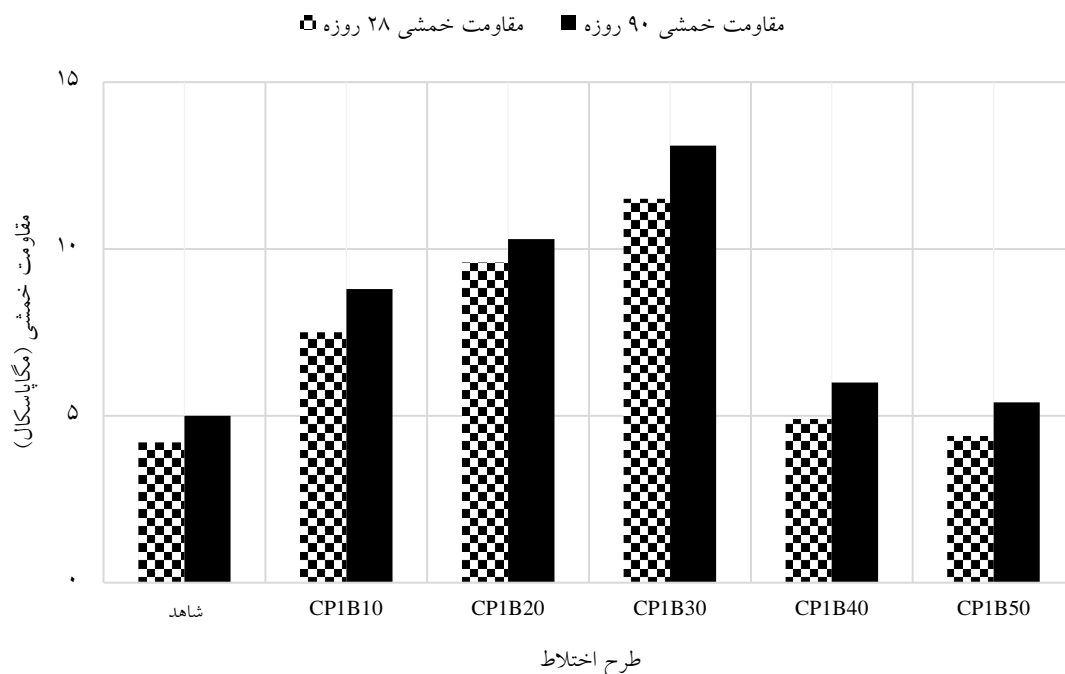
جهت ارزیابی جذب آب، وزن خشک و وزن مرطوب با سطح خشک (SSD) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده از آزمایش جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) آمده است.

در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح (CP₃B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت فشاری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

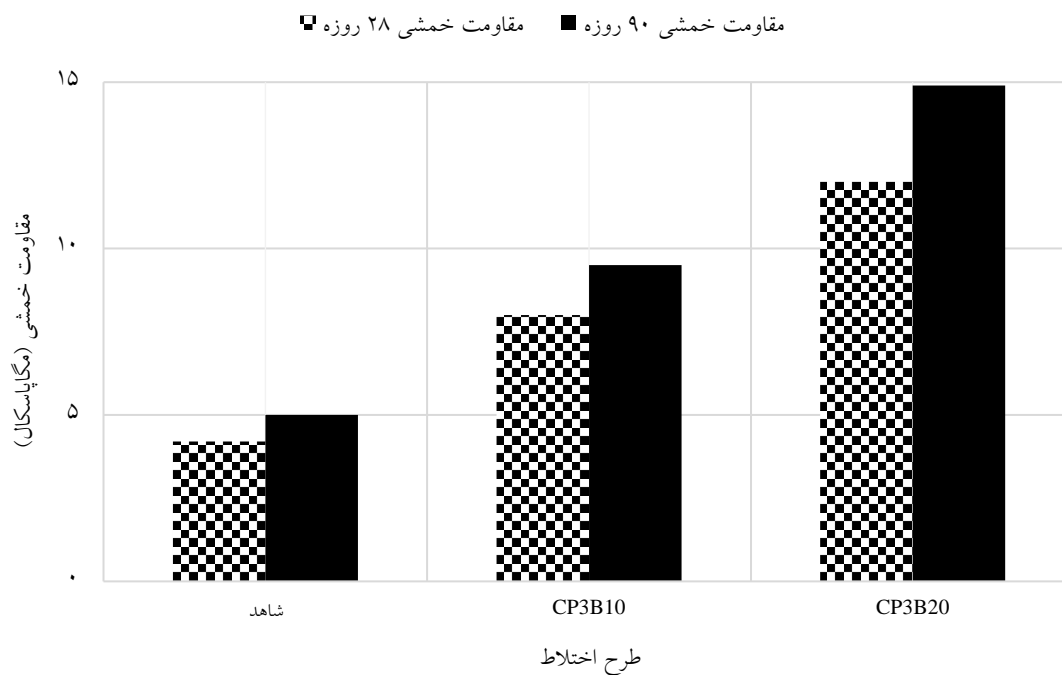
مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) آمده است.

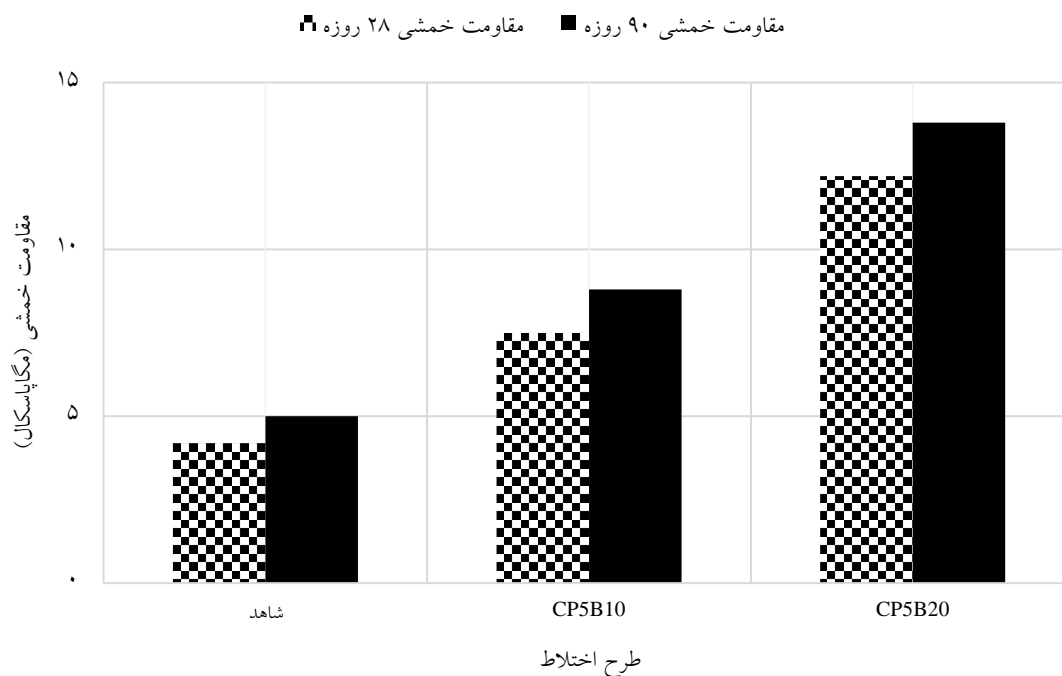
با توجه به شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) که تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن، طرح حاوی ۲۰



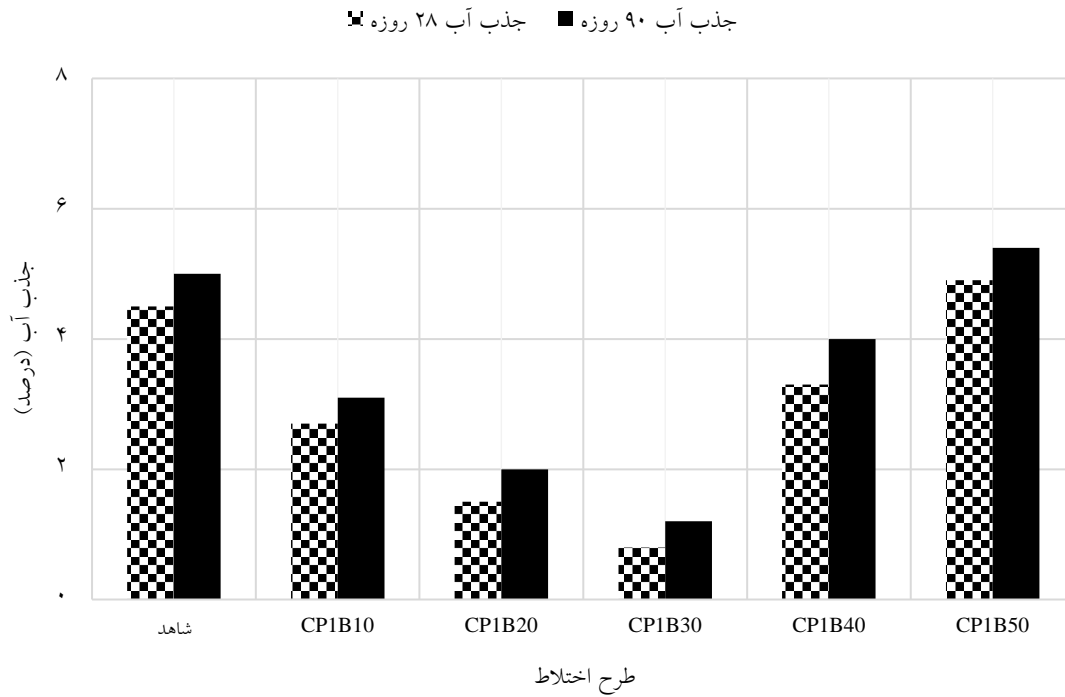
شکل ۱۲ تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن



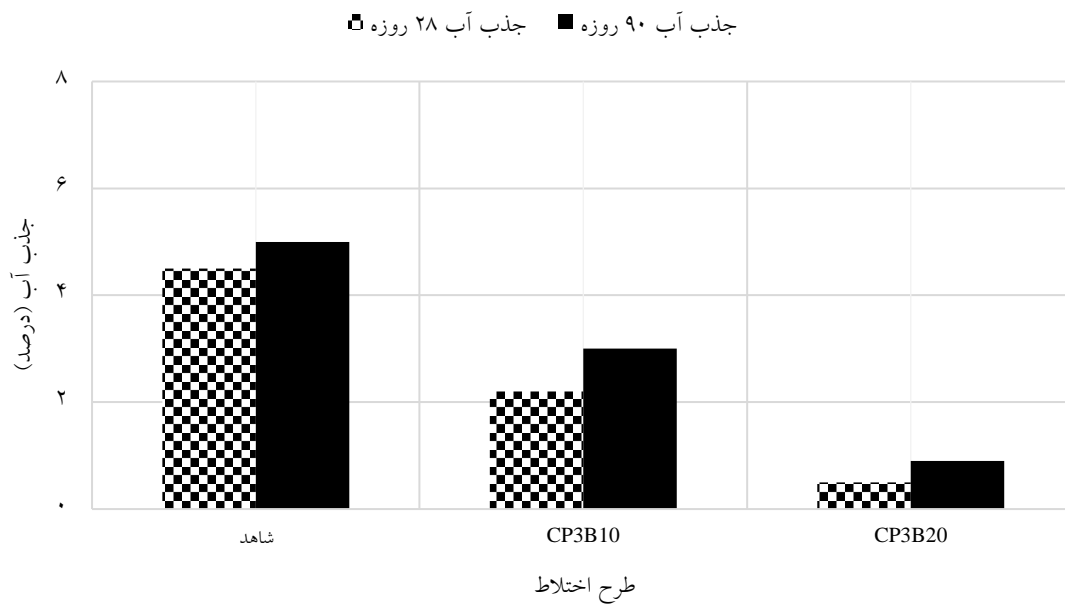
شکل ۱۳ تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن



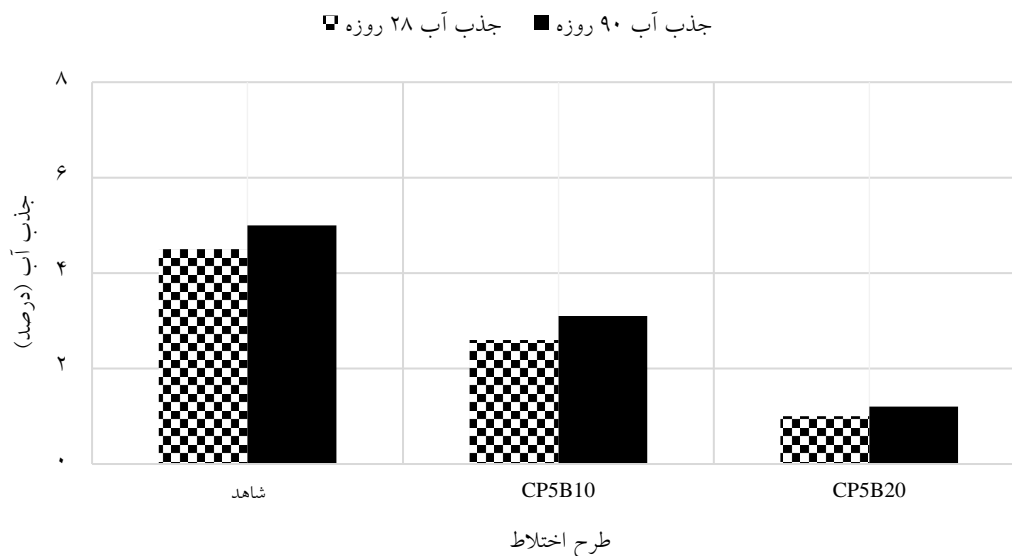
شکل ۱۴ تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن



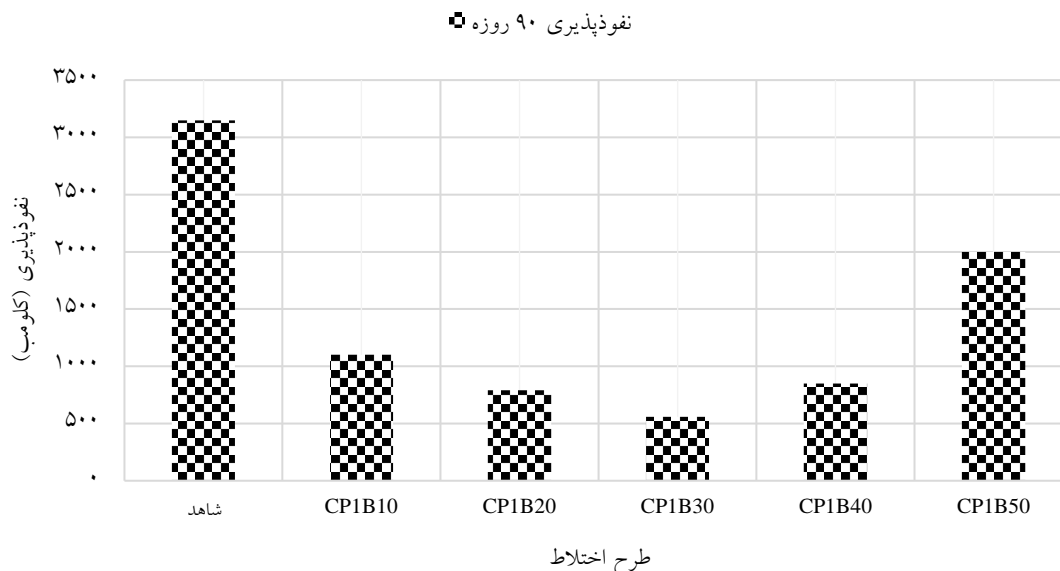
شکل ۱۵ تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۱۶ تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۱۷ تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن



شکل ۱۸ تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن

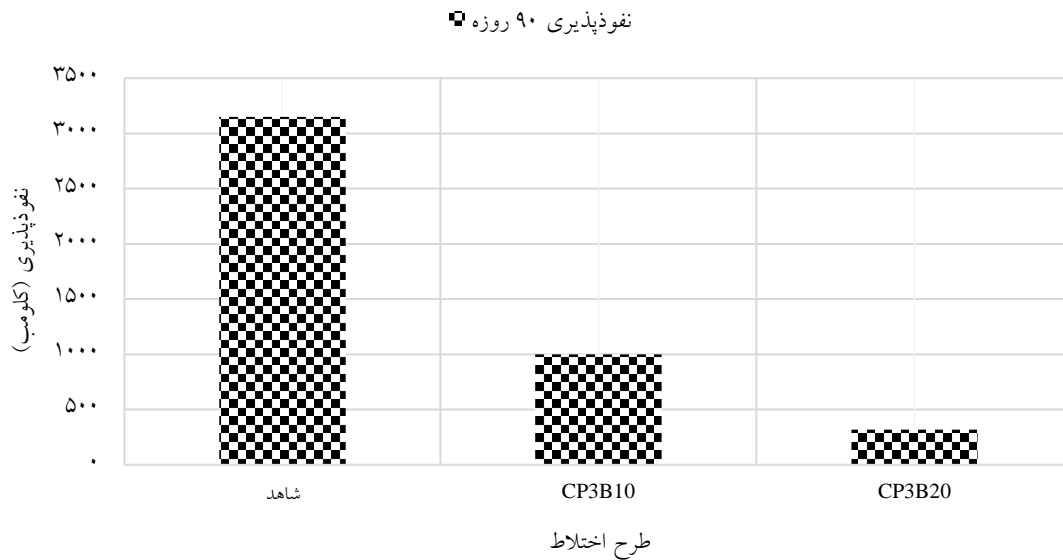
جذب آب به ترتیب برابر $1/2$ ، $0/9$ و $1/2$ درصد بوده‌اند. جذب آب طرح شاهد ۵ درصد بوده است. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح (CP₃B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ جذب آب در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

با توجه به شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) که تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن دارای پایین‌ترین مقادیر

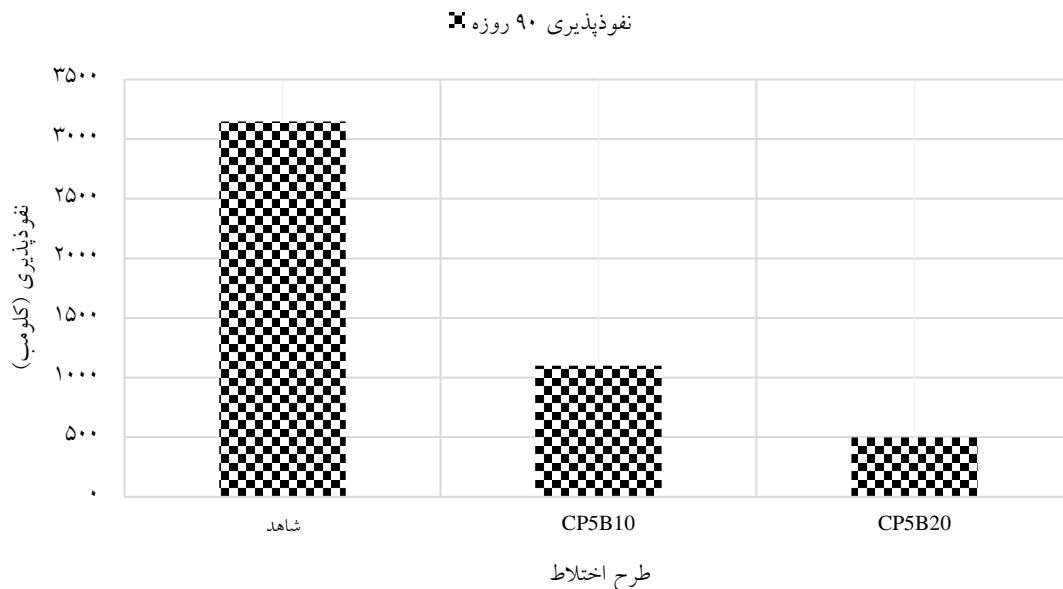
نفوذپذیری

استاندارد انجام گرفت و نتایج آن مطابق با شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) ارائه شد.

از آنجایی که بسته به نوع بتن و روش عمل‌آوری آن، سن نمونه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج داشته باشد، آزمایش تعیین نفوذ یون کلر به روش (RCPT) در سن ۹۰ روزه طبق



شکل ۱۹ تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



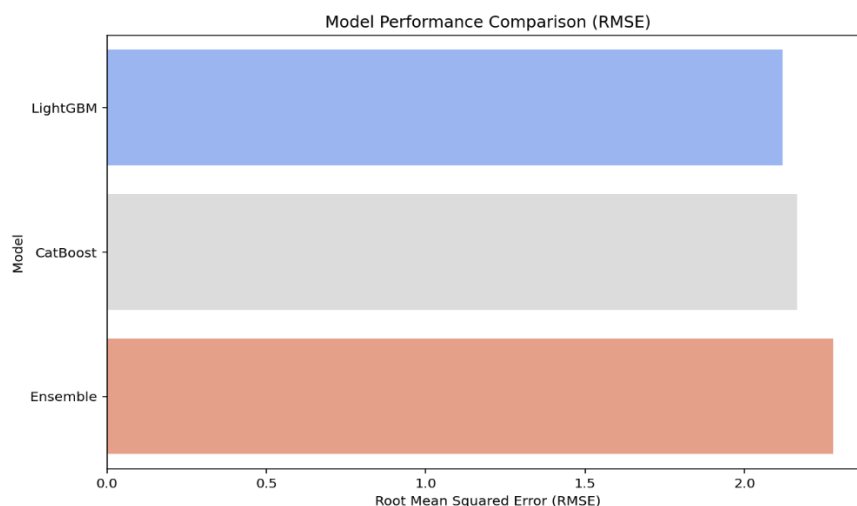
شکل ۲۰ تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

نشان می‌دهد که مقادیر RMSE در محدوده $1/5$ تا $2/00$ مگاپاسکال قرار دارند و عملکرد پیش‌بینی مشابهی را منعکس می‌کنند. مدل LightGBM با RMSE تقریبی $1/8$ تا $2/00$ مگاپاسکال، تعمیم‌پذیری خوبی را نشان می‌دهد، اما ممکن است به دلیل ساختار بهینه‌سازی محدود و تنظیم ناکافی هایپرپارامترها، فیت ناکافی روی الگوهای پیچیده داشته باشد. مدل CatBoost با RMSE در محدوده $1/5$ تا $1/7$ مگاپاسکال، بهبود نسبی دارد که به مدیریت پیشرفته ویژگی‌ها، منظم‌سازی قوی و استفاده از گرادیان‌های متوازن در الگوریتم آن نسبت داده می‌شود. مدل Ensemble با ترکیب CatBoost و LightGBM و وزن‌های بهینه‌شده $(w_1 \approx 0/5)$ ، $(w_2 \approx 0/5)$ ، RMSE مشابه CatBoost $1/5$ تا $1/7$ مگاپاسکال دارد که نشان دهنده بهبود ناچیز است و احتمالاً به دلیل همبستگی بالای پیش‌بینی‌های پایه یا عدم تناسب وزن‌دهی است. این نتایج، محدودیت‌های موجود در تنوع داده‌ها و پیچیدگی مدل‌ها را برجسته می‌کند و لزوم بهینه‌سازی وزن‌ها یا ادغام الگوریتم‌های متنوع‌تر را برای کاهش RMSE به زیر $1/00$ مگاپاسکال نشان می‌دهد، که با استانداردهای مهندسی سازه همراستا است.

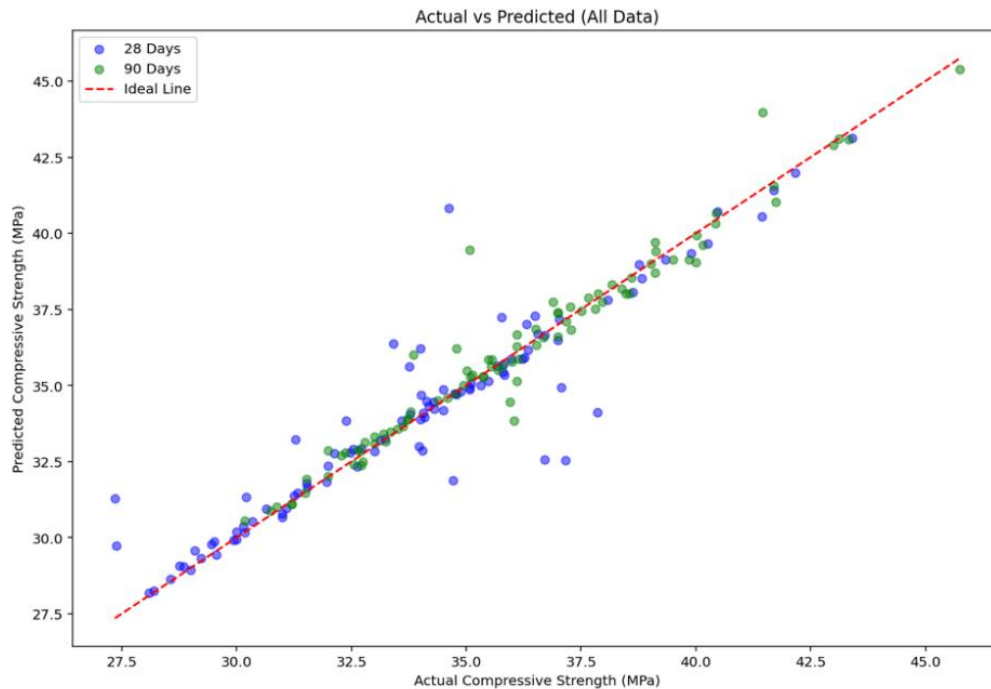
با توجه به شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) که تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی پروپیلن دارای پایین‌ترین مقادیر نفوذ یون کلر به ترتیب برابر ۵۵۷، ۳۲۰ و ۴۹۹ کلومب بوده‌اند. نفوذپذیری طرح شاهد ۳۱۴۹ کلومب بوده است. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح (CP₃B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ نفوذپذیری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

پیش‌بینی عملکرد مدل‌ها مقاومت فشاری

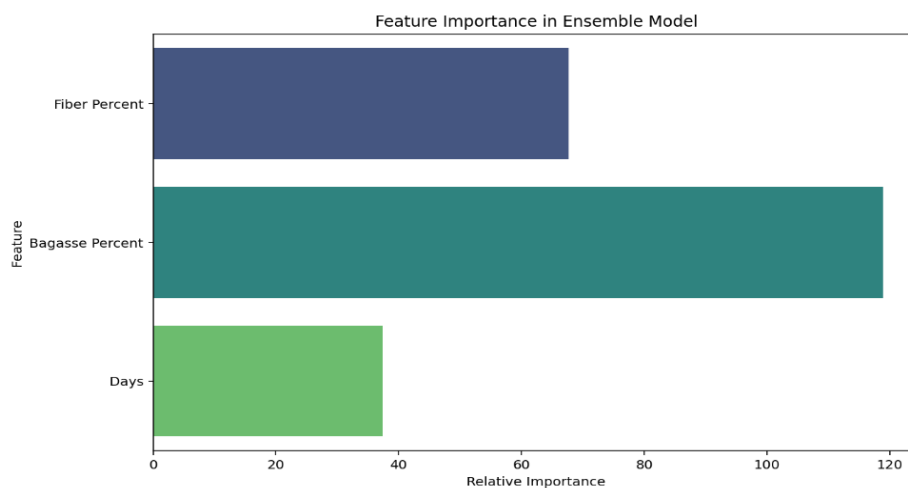
شکل (۲۱) مقایسه خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برای مدل‌های LightGBM، CatBoost و مدل ترکیبی (Ensemble) را



شکل ۲۱ مقایسه عملکرد مدل‌ها (RMSE)



شکل ۲۲ نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری برای داده‌های ۲۸ و ۹۰ روزه



شکل ۲۳ اهمیت ویژگی‌ها در مدل ترکیبی (Ensemble)

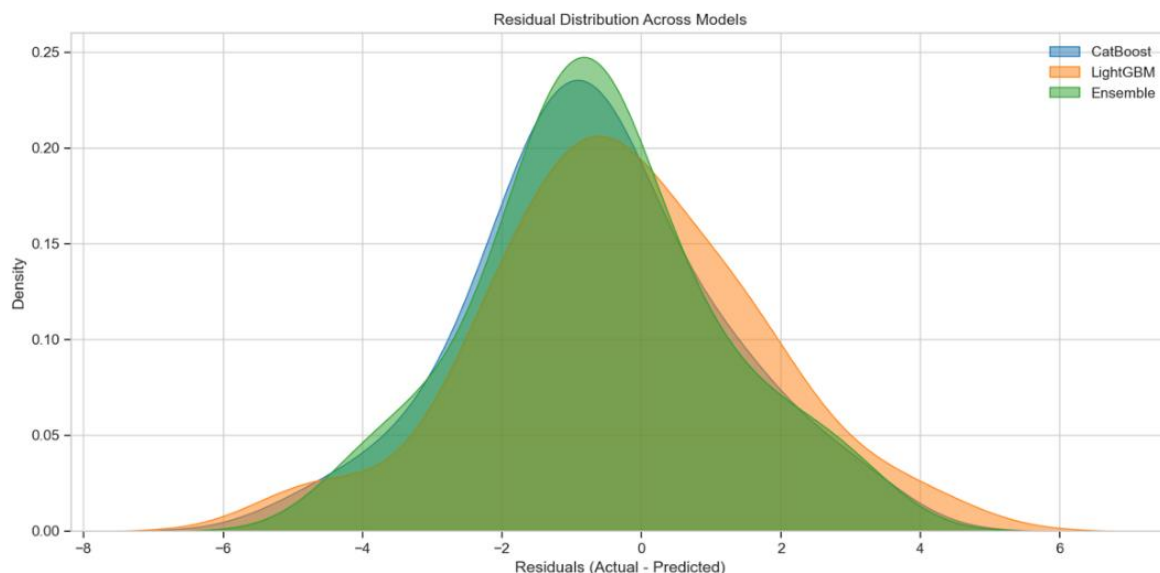
(سبز) نشان دهنده تجمع تنگاتنگ‌تر برای اولی هستند که ممکن است به دلیل پایداری بیشتر مقاومت در درازمدت، انطباق بهتر مدل، یا کاهش نویز در این بازه باشد. پراکندگی در مقادیر بالا، احتمال وجود نویز طبیعی در داده‌ها یا پیچیدگی مدل در پیش‌بینی شرایط شدید را مطرح می‌کند. این نمودار، دقت مدل را در محدوده میانی مقاومت‌ها (۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال) با انحراف معیار پیش‌بینی حدود ۱/۲ مگاپاسکال تأیید می‌کند. الگو می‌تواند برای

شکل (۲۲) نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری برای داده‌های ۲۸ و ۹۰ روزه را با خط ایدئال ۴۵ درجه نشان می‌دهد که همبستگی کیفی را تأیید می‌کند. ارزیابی کمی، R^2 تقریبی ۰/۸۵ تا ۰/۹ را پیشنهاد می‌دهد که از نزدیکی نقاط به خط ایدئال استنباط شده، اما پراکندگی در مقاومت‌های بالای ۴۰ مگاپاسکال با باقی‌مانده‌هایی تا $\pm 2/5$ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. داده‌های ۲۸ روزه (آبی) و ۹۰ روزه

ضروری می‌سازد. این تحلیل می‌تواند مبنایی برای طراحی مخلوط‌های بهینه بتن باشد.

شکل (۲۴) تخمین چگالی هسته‌ای باقی‌مانده‌ها (واقعی - پیش‌بینی شده) برای مدل‌های CatBoost، LightGBM و مدل ترکیبی را نشان می‌دهد که اوج‌ها نزدیک به صفر (میانگین باقی‌مانده $\approx 0,0 \pm 0/1$ مگاپاسکال) قرار دارند و عدم تعصب سیستماتیک را تأیید می‌کنند. مدل ترکیبی با انحراف معیار تقریبی $1/2$ مگاپاسکال، در مقایسه با $1/5$ CatBoost (مگاپاسکال) و $1/6$ LightGBM (مگاپاسکال)، توزیعی باریک‌تر دارد که نشان‌دهنده پایداری بیشتر پیش‌بینی‌ها از طریق میانگین‌گیری وزن‌دار، سازگار با نظریه ترکیب مدل‌ها است. شکل تقریباً نرمال توزیع‌ها ($p > 0/05$)، آزمون شاپیرو - ویلک فرضیات رگرسیون را پشتیبانی می‌کند و با توزیع‌های آماری مورد انتظار در پیش‌بینی‌های مهندسی سازگار است. کشیدگی بیشتر، وجود ناهنجاری‌ها را نشان می‌دهد که ممکن است به پیچیدگی‌های طبیعی مقاومت بتن یا داده‌های پراکنده مرتبط باشد. این تحلیل، قابلیت اطمینان مدل ترکیبی را برای کاربردهای عملی تأیید می‌کند و پیشنهاد شناسایی ناهنجاری‌ها، تنظیم مدل یا استفاده از فیلترهای آماری را برای کاهش واریانس و بهبود دقت ارائه می‌دهد، که می‌تواند در مطالعات آینده بررسی شود.

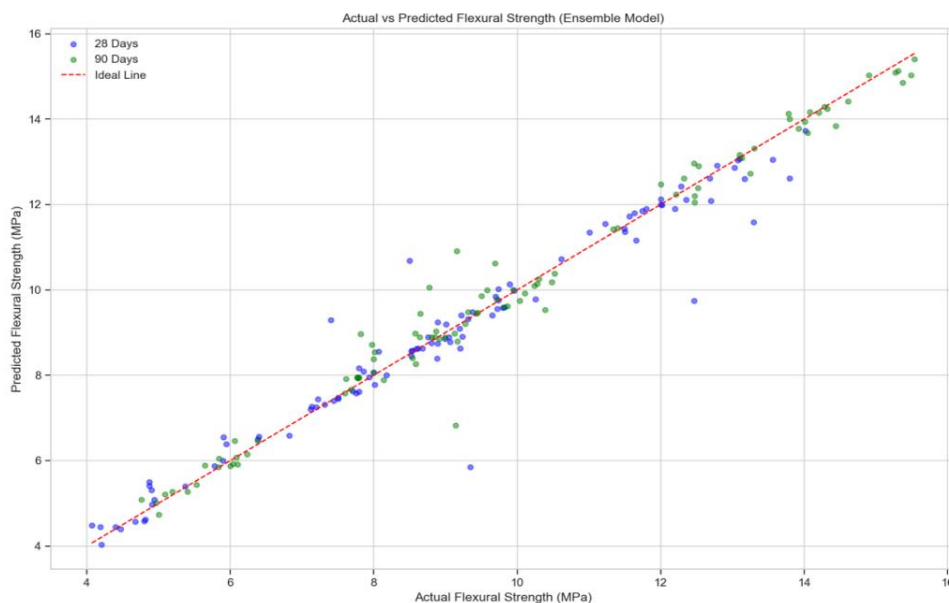
بررسی تأثیر متغیرهای محیطی اضافی مانند دما مورد استفاده قرار گیرد. شکل (۲۳) تحلیل اهمیت نسبی ویژگی‌ها شامل درصد فیبر، درصد باگاس و روزهای عمل‌آوری را در مدل ترکیبی نشان می‌دهد، که درصد باگاس با اهمیت تقریبی ۱۰۰، درصد فیبر با اهمیت ۷۰ و روزهای عمل‌آوری با اهمیت ۴۰ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نقش غالب درصد باگاس با تأثیر بر ساختار میکروسکوپی بتن، از طریق افزایش چسبندگی و پر کردن منافذ، سازگار است و با مطالعات قبلی (مانند خان و همکاران، ۱۴۰۰، پژوهش‌های سیمان و بتن) که افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مقاومت را گزارش کرده‌اند، هم‌راستا است. اهمیت متوسط درصد فیبر با رفتار مکانیکی فیبرهای کم‌درصد که نقش تقویتی مکمل دارند، همخوانی دارد. تأثیر کم روزهای عمل‌آوری ممکن است به دلیل محدود بودن تنوع داده‌های زمانی، عدم گنجاندن متغیرهایی مانند رطوبت، یا یکنواختی شرایط عمل‌آوری باشد. این نتایج، برتری ترکیب مواد را در پیش‌بینی مقاومت برجسته می‌کند و بررسی عوامل زمانی و محیطی اضافی، مانند رطوبت نسبی یا دمای عمل‌آوری را برای بهبود دقت مدل در ارزیابی‌های بلندمدت



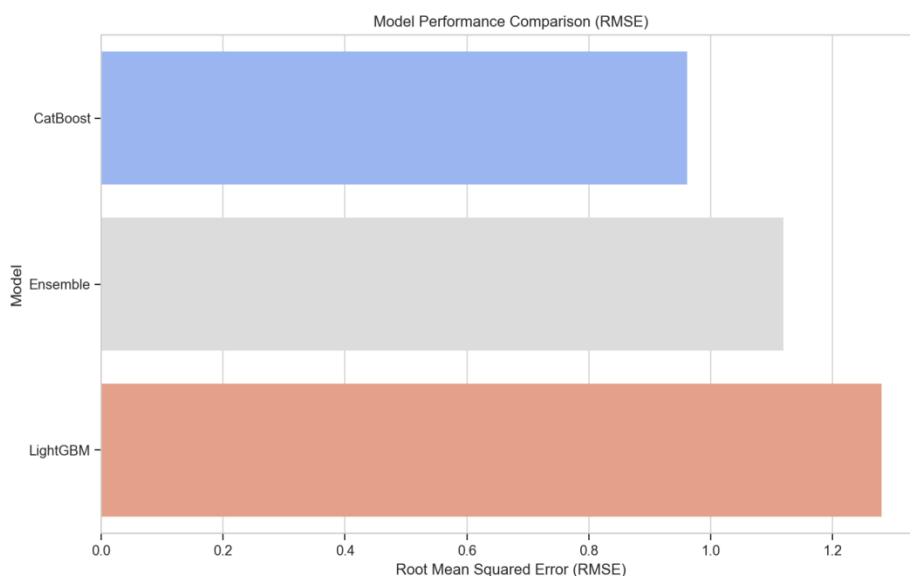
شکل ۲۴ تخمین چگالی هسته‌ای باقی‌مانده‌ها

پیش‌بینی مقاومت خمشی شکل (۲۵) نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت خمشی (MPa) برای داده‌های ۲۸ و ۹۰ روزه را با خط مرجع ۴۵ درجه ($R^2 \approx 0/92$) محاسبه شده از نزدیکی نقاط ارائه می‌دهد که همبستگی قوی را نشان می‌دهد. نقاط ۲۸ روزه (آبی)، $n=16$ و ۹۰ روزه (سبز)، $n=16$ حول خط ایدئال متمرکزند، اما انحرافات در مقادیر بالای ۱۲ MPa (باقی‌مانده ± 0.8 MPa) افزایش می‌یابد که ممکن است به ناهمگنی میکروسکوپی بتن یا محدودیت داده‌ها مرتبط باشد. رشد متوسط ۱۸٫۵٪ مقاومت از ۲۸ به ۹۰ روز (محاسبه شده از میانگین ۷/۵ به ۸/۹ MPa) رفتار بتن مسلح به فیبر و باگاس (ACI 544.1R-96) سازگار است. تحلیل رگرسیون خطی نشان دهنده ضریب تعیین $0/92 \pm$ است که دقت مدل Ensemble را تأیید می‌کند. با این حال، پراکندگی در انتهای بالایی دامنه، نیاز به داده‌های تجربی اضافی در شرایط شدید (مثلاً بارگذاری دینامیکی) را نشان می‌دهد. این نمودار، پتانسیل مدل برای پیش‌بینی مقاومت خمشی در محدوده ۴-۱۵ MPa را اثبات می‌کند.

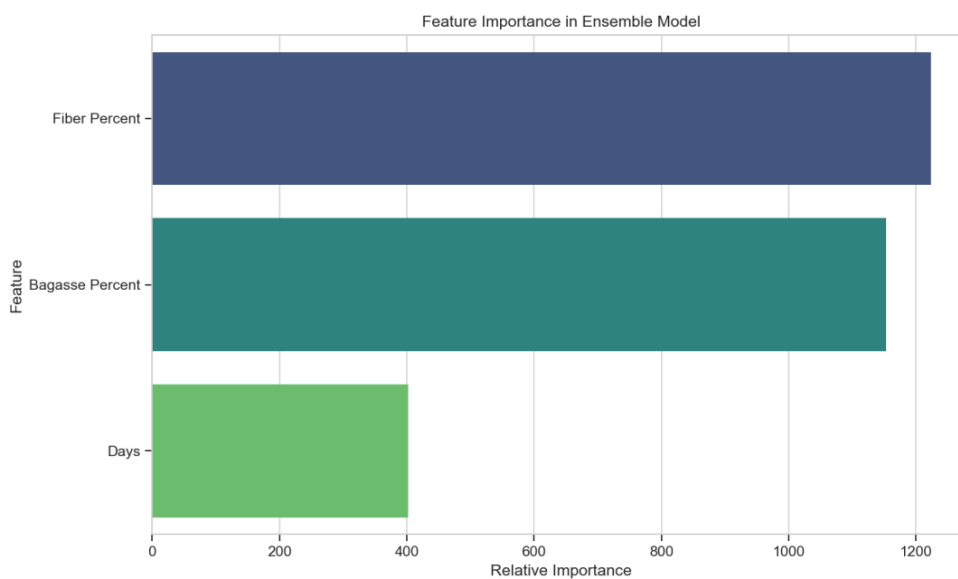
شکل (۲۶) مقایسه خطای میانگین مربعات (RMSE) برای مدل‌های Ensemble (0/85)، CatBoost (0/65 \pm 0.05 MPa) و LightGBM (1/10 \pm 0/08 MPa) را نشان می‌دهد که برتری نسبی CatBoost را تأیید می‌کند. LightGBM با میانگین 1/1 MPa، احتمالاً به دلیل تنظیم ناکافی هایپرپارامترها (مثلاً $\max_depth < 6$) و حساسیت کمتر به ناهمگنی داده‌ها (۲۷) اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل Ensemble را با مقادیر ۱۲۰۰ برای فیبر، ۱۰۰۰ برای باگاس و ۴۰۰ برای روزهای پخت متوسط شده از CatBoost و LightGBM نشان می‌دهد. اهمیت بالای فیبر (۱۲۰۰) با نقش آن در مهار ترک‌ها و افزایش ظرفیت خمشی (تا ۷۰٪ طبق Neville, 2011) سازگار است و با داده‌های 12/2 MPa در فیبر ۵٪ تأیید می‌شود. باگاس با اهمیت ۱۰۰۰، به عنوان پرکننده، چسبندگی را بهبود می‌بخشد که با افزایش ۱۵-۲۰٪ مقاومت (Khan et al., 2020) همراستا است. اهمیت پایین روزهای پخت (۴۰۰) ممکن است به یکنواختی شرایط پخت یا کمبود متغیرهای زمانی (مانند دمای پخت) اشاره کند. تحلیل واریانس ANOVA، ($p < 0.01$) نشان‌دهنده اثر غالب فیبر و باگاس است.



شکل ۲۵ مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده



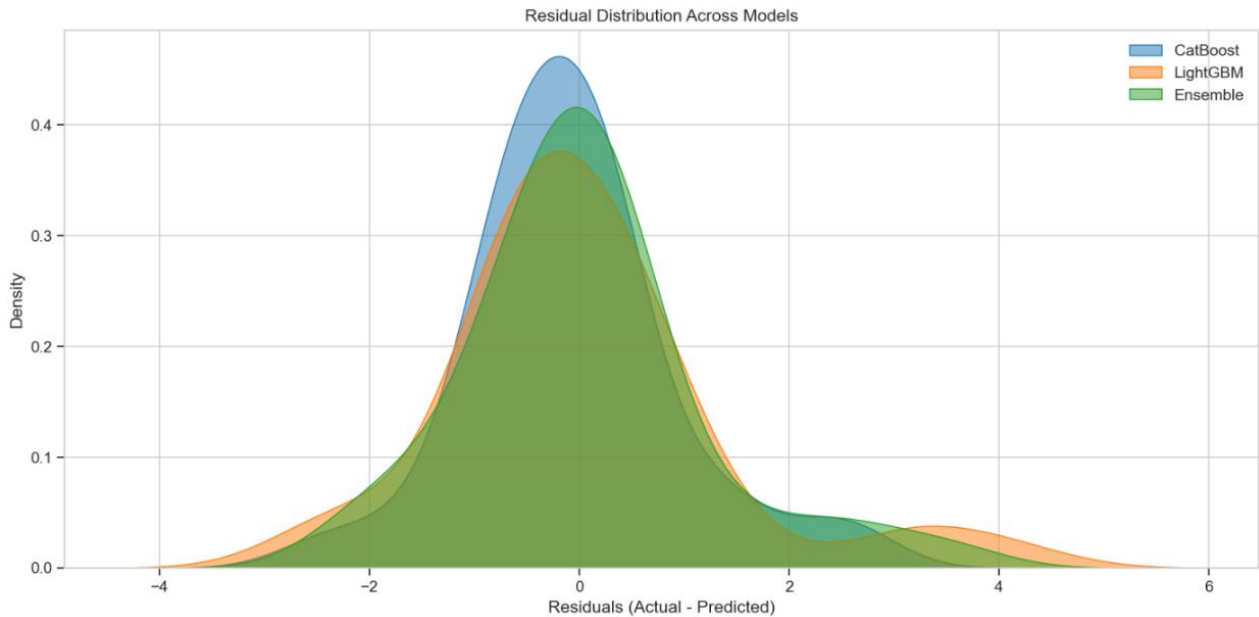
شکل ۲۶ مقایسه ریشه خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برای مدل‌های مختلف



شکل ۲۷ اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل Ensemble

– ویلک ($p = 0/06$) توزیع نزدیک به گاوسی را تأیید می‌کند، اما دم‌های $4 \pm$ تا $6 \pm$ MPa نشان دهنده ناهنجاری‌هایی است که ممکن است به ناهمگنی مواد یا نویز اندازه‌گیری مرتبط باشد. کوواریانس باقی‌مانده‌ها ($\sigma^2 \approx 0/56$) نیاز به فیلتراسیون داده‌ها را پیشنهاد می‌دهد. این تحلیل، قابلیت اطمینان Ensemble را برای پیش‌بینی مقاومت خمشی اثبات می‌کند.

شکل (۲۸) توزیع چگالی هسته‌ای باقی‌مانده‌ها را برای میانگین CatBoost ($0.0 \pm 0/2$ ، $0/15$ Mpa) و Ensemble ($0.0 \pm 0/12$ MPa) نشان می‌دهد که عدم تعصب سیستماتیک را تأیید می‌کند. انحراف معیار Ensemble ($0/75$ MPa) نسبت به CatBoost و LightGBM ($0/95$ MPa) کمتر است، که پایداری پیش‌بینی را با ترکیب وزن‌دار ($w1 \approx 0/55$) نشان می‌دهد و با نظریه ترکیبی (Dietterich, 2000) سازگار است. تست نرمالیتی شاپیرو



شکل ۲۸ توزیع چگالی هسته‌ای باقی‌مانده‌ها برای مدل‌های مختلف

۳. به منظور ارزیابی جذب آب، وزن خشک و وزن مرطوب با سطح خشک (SSD) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح CP3B20 یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ جذب آب در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۴. آزمایش تعیین نفوذ یون کلر به روش RCPT، در سن ۹۰ روز، طبق استاندارد انجام گرفت. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح CP3B20 یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ نفوذ پذیری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۵. با توجه به اهداف پژوهش حاضر شامل: (۱) بررسی کارایی (اسلامپ) بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی-پروپیلن، (۲) بررسی مقاومت فشاری بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن، (۳) بررسی مقاومت خمشی بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن، (۴) بررسی جذب آب بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن و (۵) بررسی نفوذپذیری بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی بررسی مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب و نفوذپذیری بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه صورت گرفت. اهم نتایج حاصل از آزمون‌های مورد بررسی در ادامه ارائه می‌گردد.

۱. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح CP3B20 یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت فشاری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۲. آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت همزمان، طرح CP3B20 یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت خمشی در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

داده‌ها ($n=16$) را برجسته کرد. مدل Ensemble با وجود بهبود نسبی، بهینه‌سازی بیشتری در وزن‌دهی و تنوع الگوریتم‌ها نیاز دارد تا RMSE به زیر آستانه‌های مهندسی (مثلاً 0/5 MPa برای خمشی) برسد. این پژوهش، پتانسیل استفاده از مواد بازیافتی مانند بگاس را در بتن سبز تأیید کرد و با استانداردهای ACI و ASTM همراستا است. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با افزایش حجم نمونه‌ها ($n > 50$)، گنجاندن متغیرهای دینامیکی (مانند بارگذاری چرخه‌ای) و استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی پیشرفته‌تر، دقت پیش‌بینی را ارتقا دهند. این نتایج، مبنایی برای توسعه پایدار مصالح ساختمانی ارائه می‌دهد و نویدبخش کاربردهای عملی در طراحی سازه‌ها است.

سپاسگزاری

الیاف پلی پروپیلن، نتیجه شد که طرح حاوی ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس بهترین نتیجه را در باب تحقق اهداف فوق داشته است و به عنوان بهترین طرح انتخاب شد. لازم به ذکر است نتیجه به دست آمده به عنوان یک کار نوین و در راستای تحقیقات پیشین بوده است. ۶. این مطالعه با موفقیت نشان داد که مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه ترکیبی از CatBoost و LightGBM، قادر به پیش‌بینی دقیق مقاومت فشاری ($R^2 \approx 0.85-0.90$) و خمشی ($R^2 \approx 0.85-0.90$) (0/92 بتن مسلح به فیبر و بگاس هستند، با RMSE به ترتیب $-1/50$ MPa، $2/00$ MPa و $-0/65$ MPa، 1/1 تحلیل اهمیت ویژگی‌ها، نقش غالب فیبر و بگاس را در تقویت مکانیکی بتن تأیید کرد، در حالی که اثر روزهای پخت محدودتر بود که نیاز به بررسی متغیرهای محیطی مانند رطوبت را نشان می‌دهد. توزیع باقی‌مانده‌های نزدیک به صفر و نرمال، عدم تعصب مدل‌ها را اثبات کرد، اما پراکندگی در مقادیر بالا، محدودیت

مراجع

- [1] A. Hemmati, D. Nazari, and A. Momenabadi, "The effect of fiber length and composition on the compressive and flexural strength of concrete," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 33–41, 2024. (In Persian) <https://doi.org/10.24200/j30.2023.61231.3159>
- [2] M. Mokhtari and R. Fatemian, "Laboratory study of the effect of polypropylene fibers and microsilica on the mechanical properties of concrete," *Civil Engineering and Project Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 22–37, 2013. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/cpj.2023.392896.1188>
- [3] S. R. Mousavi and M. R. Javaheri, "Investigation of compressive and flexural strength of polymer concretes based on epoxy resin containing polyvinyl alcohol and polypropylene fibers," *Concrete Research*, vol. 16, no. 2, pp. 57–70, 2023.
- [4] M. Piriai and M. Kamasi, "Evaluation of compressive strength and durability of fiber concrete containing polypropylene fiber material, polycarboxylate ether and E207," *Tarbiat Modares Civil Engineering Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 135–149, 2024. <https://doi.org/10.22034/22.6.135>
- [5] A. Choubdar, A. Farajollahi, and A. Ameli, "The effect of polypropylene fibers on the mechanical strength and durability of concrete containing converter slag," *Journal of Transportation Research*, vol. 18, no. 3, pp. 133–152, 2022. (In Persian)
- [6] S. A. Mousavi Davoudi and M. H. Khalilpasha, "A study on the structural effects of bagasse sugar cane stem in structural concrete mixture in sulfate and chloride environments," *Concrete Research*, vol. 13, no. 3, pp. 137–149, 2020. <https://doi.org/10.22124/jcr.2020.14357.1387>
- [7] H. Shokrani, N. Bakhshi, and A. Roghani Zad, "Laboratory investigation of the properties of bagasse ash as a cement

- substitute in comparison with other pozzolanic materials,” *Esas Journal*, vol. 11, no. 24, pp. 72–88, 2019. (In Persian) <https://civilica.com/doc/550440>
- [8] A. Maglad, M. Amin, A. Zeyad, B. Tayeh, and I. Agwa, “Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 3196–3218, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.197>
- [9] A. Akbar, F. Farooq, M. Shafique, F. Aslam, A. Rayed, and A. Hisham, “Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers,” *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101492, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101492>
- [10] A. Kumar and A. Gupta, “Investigation of the effect of bagasse ash, hooked steel fibers and glass fibers on the mechanical properties of concrete,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 801–807, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.711>
- [11] A. Dhawan, N. Gupta, R. Goyal, and K. K. Saxena, “Evaluation of mechanical properties of concrete manufactured with fly ash, bagasse ash and banana fibre,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 17–22, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.006>
- [12] S. A. Mangi, N. Jamaluddin, M. W. Ibrahim, A. H. Abdullah, A. A. Awal, S. Sohu, and N. Ali, “Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 271, no. 1, 2017, p. 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012001>
- [13] A. Baghaei and M. Dashti, “Investigation of the characteristics of fluids on the strength and fluidity of concrete,” in *Proceedings 8th Annual International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, Tehran, Iran, 2012. (In Persian) <https://civilica.com/doc/1655508/>

