Journal of Structural and Construction Engineering, 13(04), 2026, pp. 157-175

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Experimental–Analytical Investigation of the Properties of Concrete Containing Nano TiO_2 and Glass Fibers

Sina Etemadi[1], Mohammad Mirhosseini [2]*, Farzad Hatami bargh[3], Ata Hojjat Kashani[4], Emadeddin Hezavehei[5]

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran.
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran.
3- Associate Professor, Department of Structure and Earthquake Research Center (SERC) Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic) Tehran.
4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
5- Associate Professor, Department of Textile Engineering, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran.

ABSTRACT

Enhancing the mechanical performance and durability of concrete is a key strategy for extending the service life of structures and reducing maintenance and repair costs. In recent years, the incorporation of nanoparticles and fibers has gained significant attention as an effective approach to improving the behavior of cementitious composites. The present study investigates the combined effect of nano-TiO_2 particles and glass fibers on the tensile strength of concrete, aiming to identify an optimized mix design. For this purpose, ten concrete mixtures containing different amounts of nano-TiO_2 (0, 0.5, and 1% by weight of cement) and glass fibers (0, 0.2, 0.35, and 0.5% by volume) were prepared. Tensile strength tests were conducted at curing ages of 7, 14, 28, and 90 days in accordance with ASTM C496.The results showed a consistent increase in tensile strength with curing time for all mixtures, with an overall improvement of approximately 47–53% from 7 to 90 days. The highest tensile strength at all ages was observed in Mix No. 9, containing 1% nano-TiO_2 and 0.45% glass fibers, while the lowest values corresponded to Mix No. 1. The difference between the strongest and weakest mixtures was 24.4% at 7 days and 24.9% at 90 days, demonstrating the significant influence of the type and dosage of additives on mechanical performance. Overall, the findings indicate that the synergistic use of nano-TiO_2 and glass fibers leads to a notable enhancement in the tensile strength and microstructural development of concrete. These results highlight the importance of optimizing mix design to achieve high-performance, durable concrete and provide a practical basis for developing advanced cementitious composites for structural applications.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 September 2025
Revise Date: 10 November 2025
Accept Date: 09 December 2025

Keywords:
Concrete tensile strength
Concrete mix design
Compressive strength
Improvement of mechanical properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.541880.3803

Corresponding author: Mohammad Mirhosseini*
Email address: Mo.mirhosseini@iau.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir
Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی تجربی-تحلیلی خواص بتن با نانو TiO_2 و الیاف شیشه

سینا اعتمادی[۱]، محمد میرحسینی [۲*]، فرزاد حاتمی برق[۳]، عطا حجت کاشانی[۴]، عمادالدین هزاوه‌ای[۵]

۱ - دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲-دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۳-دانشیار، مرکز تحقیقات سازه و زلزله(SERC) ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

۴ - استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۵-دانشیار، گروه مهندسی نساجی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

چکیده

دوام و عملکرد مکانیکی بتن از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در افزایش عمر مفید سازه‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری و ترمیم به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات و الیاف در ترکیبات بتن به‌عنوان رویکردی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر هم‌زمان نانوذرات TiO_2 و الیاف شیشه بر مقاومت کششی بتن و تعیین ترکیب بهینه، ده طرح اختلاط با مقادیر مختلف نانوتیتانیوم (۰، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی سیمان) و الیاف شیشه(۰، ۰.۲، ۰.۳۵ و ۰.۵ درصد حجمی) تهیه و آزمایش شدند. آزمون مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت کششی تمامی طرح‌ها با افزایش سن عمل‌آوری روندی صعودی دارد و بین ۴۷ تا ۵۳ درصد افزایش در بازه زمانی ۷ تا ۹۰ روز مشاهده شد. بیشترین مقاومت کششی در تمامی سنین متعلق به طرح شماره ۹ بود که حاوی ۱ درصد نانو TiO_2 و ۰/۴۵ درصد الیاف شیشه است؛ در حالی که کمترین مقدار در طرح شماره ۱ مشاهده شد. اختلاف مقاومت کششی میان قوی‌ترین و ضعیف‌ترین طرح‌ها در سن ۷ روز برابر با ۲۴/۴ درصد و در سن ۹۰ روز معادل ۲۴/۹ درصد گزارش شد که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نوع و مقدار افزودنی‌ها بر عملکرد بتن است. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که ترکیب مناسب نانو TiO_2 و الیاف شیشه می‌تواند موجب بهبود قابل توجه در مقاومت کششی و ریزساختار بتن شود. این یافته‌ها اهمیت بهینه‌سازی طرح اختلاط را برای دستیابی به بتن‌های توانمند با دوام و کارایی بالا تأیید می‌کند و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه مخلوط‌های نوین در پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: مقاومت کششی بتن، طرح اختلاط بتن، مقاومت فشاری، بهبود خواص مکانیکی.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2025.541880.3803
۱۴۰۴/۰۶/۲۱	۱۴۰۴/۰۸/۱۹	۱۴۰۴/۰۹/۱۸	۱۴۰۴/۰۹/۱۸	۱۴۰۵/۰۴/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2025.541880.3803

*نویسنده مسئول: محمد میرحسینی

پست الکترونیکی: Mo.mirhosseini@iau.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، دوام مصالح ساختمانی و عملکرد بلندمدت سازه‌ها به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های مهندسی عمران و مواد تبدیل شده است. آسیب‌های زودهنگام در سازه‌های بتنی و افزایش هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری، چالش‌های اقتصادی قابل‌توجهی را برای مالکان، بهره‌برداران و دولت‌ها ایجاد کرده است. مطالعات آماری نشان می‌دهد که در کشورهای توسعه‌یافته، بخش عمده‌ای از بودجه صنعت ساخت‌وساز (بیش از ۴۰ درصد) صرف بازسازی و نگهداری سازه‌های موجود می‌شود، در حالی‌که سهم ساخت سازه‌های جدید کمتر از ۶۰ درصد برآورد شده است. این آمار، لزوم بازنگری در انتخاب مصالح و بهبود خواص آن‌ها را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

از سوی دیگر، نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید گسترده مصالح ساختمانی پرمصرف، از جمله بتن، مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف زیاد منابع طبیعی، و آلودگی محیط‌زیست، نیاز به استفاده از مصالح پایدار و بادوام را دوچندان کرده است. یکی از راهکارهای مؤثر در این زمینه، به‌کارگیری مواد افزودنی نوین از جمله نانوذرات و الیاف در ترکیب بتن می‌باشد که می‌توانند خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشند.

در سال‌های اخیر، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود از جمله ریزدانه بودن، فعالیت پوزولانی، و توانایی در پر کردن خلل و فرج خمیر سیمان، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. همچنین استفاده از الیاف شیشه به‌عنوان تقویت‌کننده فیزیکی در ماتریس بتن می‌تواند مقاومت کششی، کنترل ترک‌خوردگی و جذب انرژی را افزایش دهد. تلفیق این دو ماده افزودنی، رویکردی نوین برای ارتقاء خواص مکانیکی و دوام بتن محسوب می‌شود.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه تأثیر جداگانه نانو TiO_2 یا الیاف شیشه بر خواص بتن، بررسی هم‌زمان و ترکیبی این دو ماده در چارچوب طرح‌های اختلاط مختلف و تحلیل نتایج به‌ویژه در بازه‌های زمانی متفاوت، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر هم‌زمان نانو TiO_2 و الیاف شیشه بر مقاومت کششی بتن در قالب ده طرح اختلاط مختلف طراحی و اجرا شده است. در این تحقیق، با انجام آزمایش‌های تجربی در سنین مختلف و تحلیل روند رشد مقاومت کششی، تلاش شده است تا نقش مواد افزودنی مذکور در بهبود خواص مکانیکی بتن مورد ارزیابی قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، اپتیکی و حفاظتی مصالح ساختمانی و کامپوزیت‌ها با استفاده از نانوذرات و مواد جدید انجام شده است.

سری واستا[1] و همکاران (۲۰۲۵) با رویکرد ترکیبی آزمایشگاهی و عددی، اثر نانو TiO_2 و الیاف پلی‌پروپیلن را بر مقاومت مکانیکی و دوام بتن استاندارد بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن ۲ درصد نانو TiO_2 به همراه مقادیر متغیر الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود و مدل عددی ارائه‌شده صحت مناسبی با داده‌های تجربی دارد [۱].

در مطالعه‌ای دیگر، شهراجابیان[2] و همکاران (۲۰۲۴)، نقش نانورس در بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و کاهش‌پذیری شعله کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه و آلومینیوم تری‌هیدروکسید را بررسی کردند. یافته‌ها حاکی از افزایش حدود ۱۰ درصدی مقاومت کششی و بهبود ۴۱ درصدی مقاومت در برابر اشتعال با افزودن نانورس بود [۲].

ال‌صافی[3] و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر TiO_2 بر خواص فیزیکی، اپتیکی و محافظت در برابر پرتوهای گاما در شیشه‌های باریوم-زینک بورات را مورد بررسی قرار دادند. افزایش TiO_2 موجب افزایش چگالی، کاهش حجم مولی، کاهش تدریجی گاف نوری و افزایش ضریب تضعیف خطی شد که بهترین عملکرد حفاظتی با بیشترین مقدار TiO_2 مشاهده گردید [۳].

[1] Srivastava
[2] Shahrajabian
[3] Alsaif

مطالعه اسلام و همکاران (۲۰۲۴) یک سیستم جدید شیشه‌ای لیتیم-منیزیم-بوروسیلیکات دوپ شده با نانو اکسید مس و نانوهماتیت را به منظور بهبود محافظت در برابر پرتوهای هسته‌ای معرفی کرد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که افزایش نانو اکسید مس موجب بهبود عملکرد محافظتی در برابر گاما و نوترون‌های سریع می‌شود [۴].

ولموروگان[۴] و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی اثر افزودن نانو SiO_2 بر خواص مکانیکی و سایش کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت پرداختند و دریافتند که افزودن ۲/۵ درصد وزنی نانو SiO_2 موجب افزایش ۱۹ درصدی سختی و افزودن ۱/۵ درصد وزنی موجب افزایش ۲۹ درصدی مقاومت ضربه می‌شود. همچنین کاهش قابل توجه فرسایش با افزودن نانو SiO_2 مشاهده شد [۵].

ال‌صافی و همکاران (۲۰۲۴) همچنین اثر دوپینگ یون‌های تیتانیوم (TiO_2) را بر خواص ساختاری، دی‌الکتریک و حفاظتی شیشه‌های باریوم-زینک بورات مورد بررسی قرار دادند. افزایش TiO_2 موجب بهبود چگالی و خواص دی‌الکتریک و کاهش ضخامت لایه نیمه‌ارزش در جذب پرتو گاما شد [۶].

بال[۵] و همکاران (۲۰۲۵) در یک مرور جامع، پیشرفت‌های مواد ساختمانی نسل جدید با تمرکز بر بهینه‌سازی انرژی و پاسخ به شرایط اقلیمی را بررسی کردند. مواد مختلفی از جمله مواد تغییر فاز، آئروژل‌ها، نانوکامپوزیت‌ها و مواد زیست‌محور معرفی شده و مزایا و چالش‌های استفاده از آن‌ها در ساختمان‌های پایدار تشریح شده است [۷].

در حوزه بهینه‌سازی ترکیبات بتن حفاظتی، ساکسنا[۶] و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک، ترکیبات بتن بهینه‌ای را با عملکرد بالای حفاظتی در برابر پرتوهای گاما و نوترون و کاهش اثرات گرمایش جهانی ارائه کردند که ترکیب‌های حاوی آهن، بور، نیکل و تنگستن عملکرد برتر و کاهش بیش از ۶۵ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی نسبت به بتن معمولی داشتند [۸].

ال‌صافی و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای جامع در زمینه قابلیت محافظتی ملات‌های مختلف در برابر تابش یونیزان انجام دادند. آنها با جایگزینی بخشی از مصالح ریزدانه با تراشه‌های آهن و آهک هیدراته با Bi_2O_3 به بررسی تاثیر آن بر ضریب تضعیف خطی و محافظت در برابر پرتو گاما و نوترون پرداختند. نتایج نشان داد نمونه ملات با ۵۰ درصد تراشه آهن بهترین محافظت را ارائه می‌کند که برای کاربردهای هسته‌ای و پزشکی مناسب است [۹].

ال‌صافی و همکاران (۲۰۲۵) خواص دی‌الکتریک، اپتیکی و حفاظتی شیشه‌های بیزمو-بورات دوپ شده با CeO_2 را بررسی کردند. افزایش CeO_2 موجب بهبود چگالی، کاهش گاف نوری، افزایش شاخص شکست و کاهش طول استراحت تابشی شد که برای کاربردهای اپتوالکترونیک مناسب است [۱۰].

جیان[۷] و همکاران (۲۰۲۵) مروری جامع بر مواد پیشرفته و عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری داشتند. آنها انواع پلی‌آمیدها، تقویت‌کننده‌های الیاف شیشه و کربن، خواص خرابی و عملکردی از جمله سایش و خستگی، و فناوری‌های تولید پیشرفته مانند پرینت سه‌بعدی را بررسی کردند [۱۱].

در مطالعه‌ای که توسط آسِنگون اُتوگو بِه[۸] (۲۰۲۴) انجام شد، تأثیر شیمی پوشش‌های سطحی بر خواص بین‌فازی و دوام کامپوزیت‌های اپوکسی – الیاف شیشه در شرایط هیدروترمال[۹] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد پوشش‌های واکنش‌پذیر شامل «آمین پروپیل تری متوکسی سیلان» و ترکیب آن با «دی گلیسیدیل اتر بیسفنول آ» مقاومت بین‌فازی بالاتری نسبت به پوشش غیرواکنش‌پذیر «متیل تری اتوکسی سیلان – بوتیل گلیسیدیل اتر آلیل» دارند. همچنین پوشش‌های واکنش‌پذیر دوام بیشتری در محیط مرطوب از خود

[4] Velmurugan
[5] Bal
[6] Saxena
[7] Jain
[8] Assengone Otogo Be
[9] Hydrothermal

نشان دادند، در حالی‌که پوشش غیرواکنش‌پذیر با ایجاد اثری مشابه «بالشتک» در سطح، به کاهش میزان هیدرولیز ماتریس اپوکسی کمک نمود [۱۲].

رمضان‌اگولا[10] و همکاران (۲۰۲۵) با هدف ارتقای خواص الکتریکی بتن مسلح به الیاف شیشه جهت کاربردهای مرتبط با انرژی، افزودن نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر TiO_2 را در ماتریس بتن بررسی کردند. نتایج تجربی نشان دادند که افزودن ۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان بهینه‌ترین غلظت، باعث افزایش چشمگیر خواص دی‌الکتریک می‌شود؛ به گونه‌ای که ثابت دی‌الکتریک از حدود ۱۸۰ به حدود ۴۲۰ در فرکانس ۱۰۰ هرتز رسید. تحلیل‌های فرکانسی مانند نمودار کول-کولی و طیف‌سنجی امپدانس، مکانیزم‌های قطبش وابسته به فرکانس و دینامیک انتقال بار را نشان دادند که منجر به کاهش راکتانس خازنی و تقویت تعاملات بین‌سطحی گردید. این پژوهش، افزودنی TiO_2 را به عنوان ماده‌ای نوآورانه معرفی می‌کند که پیوندی بین عملکرد ساختاری و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در الیاف شیشه برقرار می‌سازد. بدین ترتیب، این نانوکامپوزیت‌ها قابلیت استفاده در سیستم‌های ساختاری هوشمند و دستگاه‌های ذخیره انرژی تعبیه‌شده در سازه‌ها را فراهم می‌کنند [۱۳].

مارس[11] (۲۰۲۱) به بررسی خواص مکانیکی و رفتار شکست کامپوزیت‌های ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف و نانو TiO_2 پرداخت. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و کششی نشان داد که افزودن الیاف فولادی با درصدهای ۰/۵، ۱ و ۲ درصد به ماتریس ژئوپلیمری موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری به ترتیب ۹۶/۵، ۹۰/۳ و ۷۹/۲ درصد نسبت به نمونه شاهد شد. همچنین، بهبود قابل توجهی در مقاومت کششی ناشی از چسبندگی بهتر بین الیاف و ماتریس مشاهده گردید. نمونه با ۲ درصد حجم الیاف فولادی در آزمایش خمشی رفتار سخت‌شدگی کرنش نشان داد که بیانگر افزایش مقاومت پس از شروع ترک است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که کامپوزیت‌های ژئوپلیمری تقویت‌شده با نانو TiO_2 و الیاف، پتانسیل بالایی برای کاربردهای مهندسی دارند [۱۴].

ساستری[12] و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر افزودن نانو TiO_2 را بر بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی (Fly Ash) تحت شرایط پخت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت بررسی کردند. نسبت بهینه نسبت محلول فعال‌کننده قلیایی (نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید) در ۲/۵ تعیین شد و برای مطالعه تأثیر نانو TiO_2 در درصدهای ۱ تا ۵ درصد جایگزین خاکستر بادی شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد نانوTiO_2 ، کارایی بتن کاهش و مقاومت مکانیکی آن بهبود یافت. بیشترین افزایش مقاومت در درصد ۵ درصد نانو TiO_2 مشاهده شد. همچنین، افزودن نانو TiO_2 باعث کاهش جذب آب، نفوذپذیری و ضریب سُرپتیویتی بتن شد که به بهبود مقاومت در برابر حملات سولفات و کلرید کمک می‌کند. نمونه‌ها در محلول‌های ۵ درصد سولفات منیزیم و ۵ درصد کلرید سدیم قرار گرفتند و عملکرد بهتری در مقابل این عوامل خورنده نشان دادند. بررسی‌های میکروساختاری با استفاده از SEM[13] و XRD[14] تغییرات فازهای معدنی و ساختار نمونه‌های حاوی نانو TiO_2 را تأیید کردند [۱۵].

احمد و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر پوشش‌دهی نانوذرات TiO_2 بر خواص مکانیکی الیاف شیشه E برای استفاده در کامپوزیت‌های با کارایی بالا پرداختند. الیاف شیشه با غوطه‌وری در محلول‌های حاوی درصدهای مختلف نانوذرات TiO_2 (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) پوشش‌دهی شدند و سپس آزمون کشش تک فیلامنت بر روی الیاف پوشش‌دار و بدون پوشش انجام گرفت. نتایج تحلیل به کمک توزیع وبل دو پارامتری نشان داد که الیاف پوشش‌دار احتمال شکست کمتری نسبت به الیاف بدون پوشش دارند. افزایش مقاومت کششی الیاف به ترتیب تا ۷/۳۱٪، ۱۱/۷۱٪ و ۹/۶۷٪ برای پوشش‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد گزارش شد. پوشش نانوذرات TiO_2 اثر مثبتی بر بهبود مقاومت در برابر نقص‌های سطحی ناشی از فرآیند ساخت داشته است [۱۶].

[10] Ramazanoğlu
[11] Maraş
[12] Sastry
[13] Scanning Electron Microscopy
[14] X-ray Diffraction

نجف و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی بتن سبک با رویکرد زیست‌محیطی پرداختند. در این تحقیق، پودر شیشه بازیافتی به میزان ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزن مصالح جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها شد و نانوسلیکا به میزان ۱، ۲ و ۳ درصد وزن سیمان به عنوان جایگزین جزئی سیمان مصرف گردید. همچنین الیاف پلی‌پروپیلن بازیافتی با درصدهای ۰/۵، ۱ و ۱.۵ درصد وزن سیمان برای بهبود مقاومت فشاری و رفتار غیرخطی بتن استفاده شد. به عنوان مصالح سنگدانه سبک نیز لیکا به کار رفت. نتایج آزمایش‌های ۷ و ۲۸ روزه و تحلیل‌های میکروسکوپ الکترونی میدان انتشار یافته نشان داد که نمونه بهینه شامل ۱/۵ درصد الیاف، ۳ درصد نانوسلیکا و ۲۵ درصد پودر شیشه بازیافتی است که مقاومت‌های فشاری و کششی آن به ترتیب حدود ۱/۷ و ۱/۶ برابر نمونه شاهد در ۲۸ روز می‌باشد. افزون بر این، جایگزینی ۳ درصد نانوسلیکا به جای سیمان منجر به کاهش حدود ۳ درصدی گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۱۷].

ژیونگ[15] و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به بررسی تأثیر نانو TiO_2 و الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی و دوام بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی پرداختند. نمونه‌های بتن با مقادیر مختلف نانو TiO_2 و الیاف پلی‌پروپیلن تهیه شدند. نتایج نشان داد که افزودن این دو افزودنی تأثیر بیشتری بر مقاومت کششی شکاف‌دار نسبت به مقاومت فشاری بتن داشت. بیشینه مقاومت کششی مربوط به درصد حجمی ۰/۸ درصد نانو TiO_2 و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن بود (به ترتیب ۳/۴ و ۳/۷ مگاپاسکال). بهترین میزان اثرگذاری برای نانو TiO_2 و الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب ۰/۴ و ۱ درصد تعیین شد. همچنین ترکیب این افزودنی‌ها باعث کاهش افت جرم نمونه‌ها و تشکیل تخلخل در شرایط چرخه انجماد و ذوب شده و کاهش سرعت افت مدول ارتجاعی دینامیکی بتن را کند نمود. در نهایت، تحلیل مدل RSM[16] نشان داد که هر دو ماده می‌توانند به عنوان افزودنی جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن بازیافتی استفاده شوند، اما تأثیر کلی الیاف پلی‌پروپیلن بر بهبود عملکرد بتن بازیافتی از نانو TiO_2 بیشتر است [۱۸].

نایاک[17] و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر افزودن نانو TiO_2 به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند، با تمرکز ویژه بر جذب آب، خواص مکانیکی باقیمانده پس از قرارگیری در محیط‌های هیدروترمال و خواص حرارتی. نتایج نشان داد که افزودن تنها ۰/۱ درصد وزنی نانو TiO_2 موجب کاهش ۹ درصدی ضریب نفوذ آب، افزایش ۱۹ درصدی مقاومت خمشی باقیمانده و ۱۸ درصدی مقاومت برشی میان‌لایه‌ای باقیمانده در شرایط محیط هیدروترمال شده است. این بهبود در خواص مکانیکی تحت شرایط هیدروترمال، قابلیت اطمینان استفاده از این نوع نانوکامپوزیت‌ها را در کاربردهای مهندسی مختلف افزایش می‌دهد. تحلیل‌های شکست‌شناسی با استفاده از نمودارهای ویبول نشان‌دهنده سازوکارهای شکست و تقویت متفاوت در محیط‌های خشک و هیدروترمال بود و توافق خوبی با داده‌های تجربی داشت [۱۹].

بایکریکار[18] و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی اثرات ترکیبی پودر شیشه بازیافتی و نانو TiO_2 بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداختند. در این تحقیق، ۱۰٪ از سیمان با پودر شیشه جایگزین شده و نانو TiO_2 به عنوان افزودنی در مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱.۵ درصد وزنی به مخلوط اضافه گردید. خواص تازه بتن مانند زمان گیرش و کارایی، و همچنین خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی ارزیابی شدند. دوام بتن در برابر جذب آب، حملات اسیدی، سولفاتی، کلریدی و شرایط دمایی بالا نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب پودر شیشه بازیافتی با نانو TiO_2 به طور هم‌افزا باعث بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و دوام بتن شده است، هرچند افزودن نانو TiO_2 موجب کاهش کارایی بتن شد. تحلیل‌های میکروسکوپی الکترونی نشان‌دهنده تغییرات مورفولوژیکی مثبت در ساختار بتن بود [۲۰].

Saradarو همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به تأثیرات نسبی افزودنی‌های دوده سیلیکا، نانو سیلیکا و نانو TiO_2 فوق ریز ($UFTiO_2$) بر خواص مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی پرداختند. نتایج نشان داد که دوده سیلیکا و نانو سیلیکا موجب افزایش مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌ها شده‌اند، در حالی که دوده سیلیکا تأثیر قوی‌تری در افزایش دوام داشت. حضور $UFTiO_2$ باعث

[15] Xiong
[16] Response Surface Methodology
[17] Nayak
[18] Baikerikar

افزایش مقاومت فشاری به میزان ۴–۷٪ در نمونه‌های دوده سیلیکا و ۸–۱۴٪ در نمونه‌های نانو سیلیکا گردید. همچنین، $UFTiO_2$باعث بهبود مقاومت خمشی به میزان ۱۶–۲۵٪ در نمونه‌های دوده سیلیکا نسبت به نمونه‌های نانو سیلیکا شد. افزایش مقاومت الکتریکی نیز در محدوده ۱۴/۵–۳۱/۵٪ پس از ۱۴ روز مشاهده شد. تاثیر قابل توجهی نیز بر مقاومت در برابر سایش گزارش شده است. نتایج آزمون ضربه و شکست نمونه‌ها با توزیع ویبول دو پارامتری همخوانی مناسبی داشت. این مطالعه پتانسیل بالای نانو مواد را در ارتقای عملکرد کامپوزیت‌های سیمانی برای کاربردهای متنوع نشان می‌دهد [۲۱].

۲- روش تحقیق

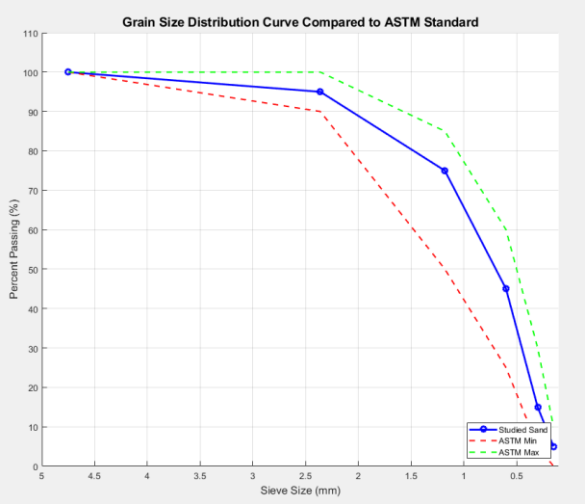
به‌منظور بررسی تأثیر هم‌زمان نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی و دوام بتن، این پژوهش با رویکردی ترکیبی شامل آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی انجام شده است. فرآیند تحقیق در دو بخش اصلی طراحی و اجرا شده است:

۲-۱- بخش آزمایشگاهی

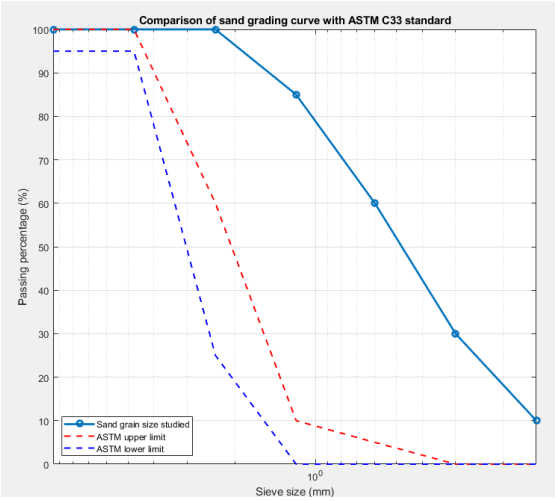
در بخش آزمایشگاهی، نمونه‌های بتن با طرح اختلاط ثابت پایه و با مقادیر مختلفی از نانو TiO_2 (۰، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی نسبت به سیمان) و الیاف شیشه (۰، ۰.۵ و ۱ درصد حجمی) ساخته شدند. تمامی مصالح مصرفی شامل سیمان پرتلند نوعII ، سنگدانه‌های طبیعی با دانه‌بندی مناسب، آب آشامیدنی و افزودنی روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات بوده است. نانو TiO_2 مورد استفاده دارای اندازه ذرات حدود ۳۰ نانومتر و سطح ویژه بالا بوده و پیش از اختلاط، به‌صورت پراکنده در آب اختلاط با استفاده از دستگاه همزن مغناطیسی و اولتراسونیک آماده‌سازی شده است. انتخاب محدوده درصدهای نانو TiO_2 و الیاف شیشه بر اساس مطالعات معتبر پیشین و ملاحظات عملی انجام گرفت. نتایج پژوهش‌های متعددی نشان می‌دهد که مقادیر بیش از ۳ % نانو TiO_2 به دلیل تمایل به تجمع ذرات، افزایش نیاز به آب و افت کارپذیری بتن، تأثیر منفی بر مقاومت مکانیکی دارد [۲۲-۲۴]. بنابراین بازه ۰-۳ %به‌عنوان محدوده بهینه بررسی انتخاب شد. در مورد الیاف شیشه نیز پژوهش‌ها بیانگر آن است که مقادیر بیش از ۱ %حجمی باعث ایجاد مشکل در اختلاط، پدیده گلوله‌ای شدن و کاهش یکنواختی توزیع الیاف می‌شود، در حالی‌که مقادیر ۰/۵ %و ۱ %بیشترین اثر مثبت را بر بهبود مقاومت فشاری و کششی نشان داده‌اند [۲۵-۲۸].

پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون‌های استاندارد مقاومت فشاری(ASTM C39) ، مقاومت کششی دو نیم‌شدگی (ASTM C496) و مقاومت خمشی (ASTM C78) در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) انجام شده است. به‌منظور ارزیابی دوام، آزمون نفوذ یون کلریدRCPT) ، مطابق (ASTM C1202 و آزمون جذب آب (ASTM C642) نیز بر روی نمونه‌های انتخابی صورت گرفت. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل شده و از آزمون‌های آماری ANOVA جهت بررسی معناداری نتایج استفاده گردید.

شن و ماسه مصرف شده در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM C33 می باشد. مدول نرمی سنگدانه ریز (ماسه) برابر ۳/۴۶ و حداکثر اندازه سنگدانه درشت (شن) برابر ۱۴/۷ میلیمتر در نظر گرفته شد. دانه بندی سنگدانه ها مطابق استاندارد ASTM C136 در نظر گرفته شد. در ابتدا با استفاده از الک با شماره های مختلف، شن و ماسه مورد نیاز را نامگذاری کردیم و ذرات عبوری از الک ۱۰۰ هم برای جلوگیری از ایجاد پیوند کامل بین سنگدانه ها با مواد ترکیبی در تولید سیمان دور ریخته شد. انتخاب دانه ها سعی کردیم که از دانه های گوشه دار استفاده کنیم و تا حد امکان آنها راجایگزین دانه های سوزنی و گرد کردیم تا اصطکاک بهتری در بتن ایجاد شود و مقاومت بالاتری داشته باشد. خواص دیگر سنگدانه در شکل ۱ ارائه شده است. در شکل ۲ خواص فیزیکی شن ارائه شده است.



شکل ۱: خواص فیزیکی ماسه



شکل۲: خواص فیزیکی شن

دانه‌بندی شن مورد مطالعه بر اساس نتایج آزمایشگاهی با استاندارد ASTM C33 برای شن درشت‌دانه مقایسه شد. این استاندارد محدوده مجاز عبور ذرات شن را از الک‌های مختلف تعریف می‌کند. در این بررسی، الک‌های استاندارد شماره ۸/۳ اینچ (۹/۵ میلی‌متر)، شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر)، شماره ۸ (۲/۳۶ میلی‌متر)، شماره ۱۶ (۱/۱۸ میلی‌متر)، شماره ۳۰ (۰/۶ میلی‌متر)، شماره ۵۰ (۰/۳ میلی‌متر) و شماره ۱۰۰ (۰/۱۵ میلی‌متر) مورد استفاده قرار گرفتند.

مقادیر درصد عبور برای شن مورد مطالعه با محدوده استاندارد مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که منحنی دانه‌بندی شن مورد آزمایش در تمام مقاطع با محدوده مجاز استاندارد تطابق دارد. به عبارت دیگر، کلیه درصدهای عبور از الک‌ها در بازه تعیین‌شده توسط ASTM C33قرار داشته و هیچ‌گونه مغایرتی مشاهده نگردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دانه‌بندی این شن مطابق با الزامات استاندارد بوده و برای استفاده در بتن مناسب می‌باشد.

مصالح اصلی مورد استفاده در این پژوهش شامل سیمان پرتلند تیپ II ، آب، فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات و الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه می‌باشند. آب بتن نقش حیاتی در ایجاد روانی و کارایی مخلوط ایفا می‌کند و علاوه بر تأمین قابلیت ریختن و تراکم، با واکنش هیدراسیون سیمان مقاومت نهایی بتن را فراهم می‌آورد.

فوق روان‌کننده‌ها، که پایه شیمیایی آن‌ها لیگنو سولفونات یا پلی‌کربوکسیلات اصلاح شده است، به منظور افزایش روانی و کاهش مصرف آب در بتن به کار می‌روند. این افزودنی‌ها با کاهش نیروهای بین ذره‌ای در خمیر سیمان، باعث افزایش روانی مخلوط بدون تأثیر منفی بر کشش سطحی آب می‌شوند. فوق روان‌کننده‌ها می‌توانند خواص متنوعی مانند دیرگیر کنندگی، حفظ اسلامپ، تولید بتن خودتراکم و افزایش مقاومت اولیه و نهایی را فراهم کنند. استفاده مناسب از فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر در ترکیب با سیمان پرتلند موجب کاهش ویسکوزیته و بهبود هیدراتاسیون بتن می‌شود و افزایش کارایی و دوام را به همراه دارد. همچنین فوق روان‌کننده‌های نسل چهارم که در این پژوهش استفاده شده‌اند، قادر به کاهش مصرف آب تا ۴۵٪ می‌باشند و بدون تغییر نسبت آب به سیمان، کیفیت و مقاومت بتن را بهبود می‌بخشند.

الیاف پلی‌پروپیلن با قطر حدود ۲۲ میکرومتر و طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر به منظور افزایش مقاومت کششی و کنترل ترک‌خوردگی در بتن به کار رفته‌اند. همچنین الیاف شیشه با مقاومت کششی بالای ۱۰۰۰ مگاپاسکال در ترکیب بتن استفاده شده و عملکرد مکانیکی و دوام بتن تقویت شده با نانوتیتانیوم دی‌اکسید و الیاف شیشه به طور جامع مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تمامی مصالح مصرفی در این مطالعه دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی منطبق با استانداردهای معتبر بوده و در محدوده مجاز قرار دارند، که این امر امکان حصول نتایج دقیق و قابل اطمینان را در آزمایش‌های مکانیکی و دوام فراهم می‌آورد.

۳- طرح اختلاط بتن

برای طرح اختلاط بتن با توجه به نوع سنگدانه و چگالی بتن ۲۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است و براساس محاسبات انجام شده درصد مصالح استفاده شده مانند جدول ۱ می باشد. در جدول ۱ طرح اختلاط مورد استفاده در ساخت بتن به منظور انجام آزمایشات آورده شده است:

جدول ۱: طرح اختلاط مورد استفاده

آب (کیلوگرم/مترمکعب)	فوق‌روان‌کننده (کیلوگرم/مترمکعب)	شن (کیلوگرم/مترمکعب)	ماسه (کیلوگرم/مترمکعب)	میکروسیلیس (کیلوگرم/مترمکعب)	سیمان (کیلوگرم/مترمکعب)	الیاف شیشه (٪ وزن بتن)	نانو تیتانیوم (٪ سیمان)	طرح اختلاط
۱۵۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۲	۰/۵	۱
۱۵۵	۹	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۲۵	۰/۶	۲
۱۶۰	۱۰	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۳	۰/۷۵	۳
۱۶۵	۱۱	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۳۵	۱	۴
۱۴۵	۸	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۴	۰/۵	۵
۱۵۰	۹	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۳	۰/۷	۶
۱۶۰	۱۰	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۵	۰/۶	۷
۱۵۵	۹	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۲	۰/۸	۸
۱۶۵	۱۲	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰/۴۵	۱	۹
۱۶۰	۱۰	۸۵۰	۸۵۰	۵۰	۵۰۰	۰.۴	۰/۷۵	۱۰

در این مطالعه، برای هر یک از طرح‌های مورد نظر سه نمونه در محل ساخت بتن تهیه شد. این نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و خمشی در قالب‌های از پیش روغن‌زده ریخته شدند. ساخت مخلوط‌های بتنی به این صورت انجام شد که ابتدا مواد خشک شامل ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها در میکسر با هم ترکیب شدند، سپس آب به مخلوط اضافه و اختلاط به مدت ۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه ادامه یافت. پس از اختلاط، بتن در قالب‌ها ریخته شد و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و به منظور عمل‌آوری در آب نگهداری شدند. دمای محیط ساخت بتن در محدوده ۱۸ تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد بوده است. آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌ها شامل نفوذپذیری، مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌باشد.

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری بتن

آزمایش مقاومت فشاری بتن یکی از روش‌های استاندارد و کلیدی برای ارزیابی کیفیت و مناسب بودن بتن برای کاربردهای مورد نظر است. این آزمایش معمولاً بر روی نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای انجام می‌شود و اطلاعات مهمی درباره مقاومت بتن در برابر تنش‌های فشاری ارائه می‌دهد.

نمونه‌های مکعبی معمولاً در ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر، بسته به اندازه سنگدانه‌های استفاده‌شده در بتن، تهیه می‌شوند. دقت ابعادی نمونه‌ها باید تا ۰.۰۵ میلی‌متر رعایت شود و سطح آن‌ها کاملاً صاف و یکنواخت باشد تا نتایج آزمایش تحت تأثیر ناهمواری‌ها قرار نگیرد. فرآیند آماده‌سازی به شرح زیر است:

- ریختن بتن :بتن تازه در قالب‌های استاندارد ریخته شده و به‌خوبی متراکم می‌شود.
- خروج از قالب :پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج می‌شوند.
- عمل‌آوری :نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در محیط مرطوب (با رطوبت نسبی بالا) نگهداری شده و سپس در آب با دمای کنترل‌شده حدود ۲۷ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. آب باید هر هفته تعویض شود تا شرایط عمل‌آوری یکنواخت حفظ گردد.
- سن آزمایش :نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز برای انجام آزمایش مقاومت فشاری آماده می‌شوند، زیرا این سنین معیار استاندارد برای ارزیابی مقاومت بتن هستند.

آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه بارگذاری انجام می‌شود. بار به صورت یکنواخت و با نرخ افزایش حدود ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در دقیقه اعمال می‌شود تا نمونه به نقطه شکست برسد. بار شکست ثبت‌شده، مقاومت فشاری بتن را تعیین می‌کند. برای اطمینان از دقت نتایج، حداقل سه نمونه برای هر طرح اختلاط آزمایش می‌شود. اگر اختلاف مقاومت فشاری بین نمونه‌ها بیش از ۱۵ درصد باشد، نتایج قابل‌قبول نبوده و آزمایش باید تکرار شود. در غیر این صورت، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه به عنوان مقاومت نهایی گزارش می‌شود.

فرض اصلی آزمایش، اعمال فشار تک‌محوری خالص است. با این حال، در عمل، اصطکاک بین صفحات دستگاه بارگذاری و سطح نمونه باعث ایجاد محدودیت در کرنش جانبی و تولید فشار محصورسازی موضعی می‌شود. این فشار در نواحی انتهایی نمونه بیشترین مقدار را دارد و می‌تواند همراه با تنش‌های برشی موضعی، بر نتایج آزمایش تأثیر بگذارد. این عوامل باید در تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش مدنظر قرار گیرند تا از دقت و صحت ارزیابی اطمینان حاصل شود.

برای انجام آزمایشات فشاری در این پژوهش نمونه های بتنی مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر ساخته شد و سپس نمونه ها در سنین ۳ ، ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

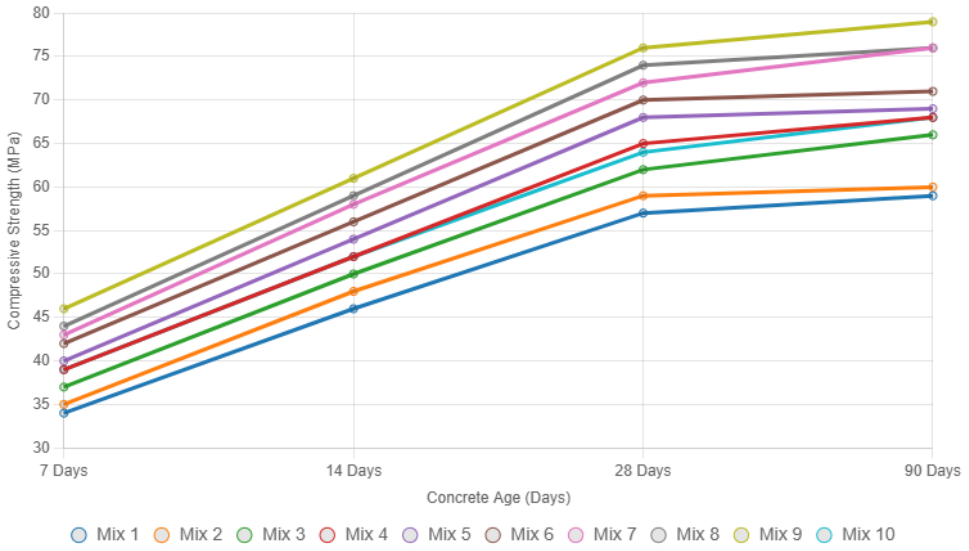
آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها را طبق استاندارد BS 1881-116 قرار گرفته است و نمونه ها در آزمایشگاه بتن با استفاده از دستگاه جک ۲۰۰ تن تحت بار یکنواخت 140 $kg/cm^2/min$ قرار گرفتند [۲۸].

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی بتن

اکثراً برای تعیین مقاومت کششی از نمونه استوانه ای استفاده می شود.نمونه طوری بین صفحات دستگاه جک بتن شکن قرار می گیرد که محور آن افقی باشد و سپس بار افزایش پیدا می کند تا گسیختگی به صورت دو نیم شدن در صفحه شامل قطر قائم نمونه به وجود آید. این روش آزمایش در بخش ۱۱۷ ASTM C496-71 و BS 1881-8371 (بازبینی شده در سال ۱۹۷۹ و ۱۹۹۰) توصیه شده است [۲۸-۲۹].

۴- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه پارامترهای مختلف بر رفتار مکانیکی ملات یا بتن است. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها به طور پیوسته افزایش یافت که این امر ناشی از تکمیل فرآیند هیدراتاسیون و تشکیل محصولات سخت‌کننده در ساختار سیمان است. همچنین، افزودن مواد تکمیلی مانند نانوذرات یا خاکستر بادی موجب بهبود مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد گردید. این افزایش مقاومت به دلیل عملکرد تسریع‌کننده و پرکننده نانوذرات و واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی است که باعث بهبود چگالی و کاهش تخلخل ساختار می‌شود. در شکل ۳ نمودار مقایسه ای آزمایش فشاری رسم شده است.



شکل ۳: مقاومت فشاری طرح اختلاط مورد نظر در سنین مختلف

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای ۱۰ طرح اختلاط بتن ارائه شده است که در آن‌ها تأثیر افزودنی‌هایی نظیر نانوتیتانیوم و الیاف شیشه بر مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه بررسی شده است. در ادامه، تحلیل جامعی از داده‌ها ارائه می‌شود و برای نمایش روند تغییرات مقاومت، نمودارهایی ترسیم خواهد شد.

نتایج مقاومت فشاری به شرح زیر می باشد:

- مقاومت فشاری ۷ روزه: بین ۳۴ تا ۴۶ مگاپاسکال، با بیشترین مقدار در طرح ۹ (۴۶ مگاپاسکال).
- مقاومت فشاری ۱۴ روزه: بین ۴۶ تا ۶۱ مگاپاسکال، با بیشترین مقدار در طرح ۹ (۶۱ مگاپاسکال).
- مقاومت فشاری ۲۸ روزه: بین ۵۷ تا ۷۶ مگاپاسکال، با بیشترین مقدار در طرح ۹ (۷۶ مگاپاسکال).
- مقاومت فشاری ۹۰ روزه: بین ۵۹ تا ۷۹ مگاپاسکال، با بیشترین مقدار در طرح ۹ (۷۹ مگاپاسکال).
- طرح ۹ (۱٪ نانوتیتانیوم و ۰.۴۵٪ الیاف شیشه) به طور مداوم بالاترین مقاومت را در تمام سنین نشان می‌دهد.
- افزایش درصد نانوتیتانیوم (از ۰.۵٪ تا ۱٪) و الیاف شیشه (تا ۰.۵٪) در اکثر موارد با افزایش مقاومت فشاری همراه است.
- طرح ۹ با ۱٪ نانوتیتانیوم و ۰.۴۵٪ الیاف شیشه بهترین عملکرد را دارد، در حالی که طرح ۱ با ۰.۵٪ نانوتیتانیوم و ۰.۲٪ الیاف شیشه کمترین مقاومت را نشان می‌دهد.
- افزودن الیاف شیشه به نظر می‌رسد تأثیر بیشتری نسبت به نانوتیتانیوم در افزایش مقاومت در سنین بالاتر (۲۸ و ۹۰ روز) داشته باشد (مقایسه طرح ۷ با ۰.۵٪ الیاف شیشه و طرح ۸ با ۰.۲٪ الیاف شیشه).

- نسبت آب به سیمان در طرح‌ها بین ۰.۲۹ تا ۰.۳۳ متغیر است. طرح ۵ با کمترین مقدار آب (۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و نسبت آب به سیمان ۰.۲۹، مقاومت بالایی (۶۹ مگاپاسکال در ۹۰ روز) نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاهش نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری است.

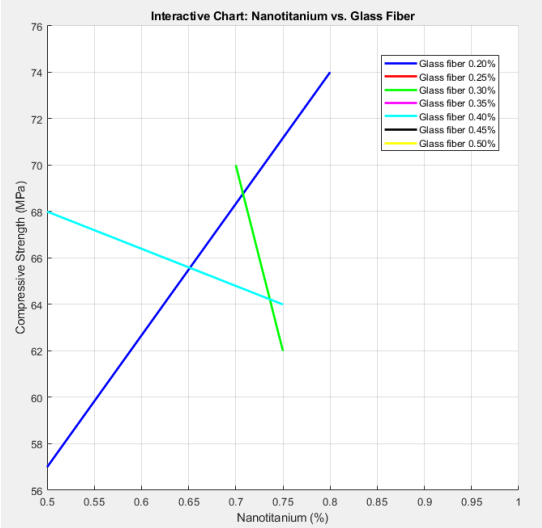
برای نمایش روند تغییرات مقاومت فشاری در سنین مختلف، نمودار زیر ترسیم شده است:

- طرح ۹ با ۱٪ نانوتیتانیوم و ۰.۴۵٪ الیاف شیشه بالاترین مقاومت فشاری را در تمام سنین نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان طرح بهینه انتخاب شود.
- کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش درصد الیاف شیشه تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری، به‌ویژه در سنین بالاتر، دارد.
- برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت فشاری بالا در ۲۸ روز یا بیشتر دارند، طرح‌های ۷، ۸ و ۹ مناسب‌ترین گزینه‌ها هستند.
- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها نشان‌دهنده روند مثبت و قابل توجهی در افزایش مقاومت با گذر زمان و تغییر در طرح اختلاط است که می‌توان آن‌ها را از دو منظر مقایسه و ارزیابی کرد:
- مقاومت فشاری در تمام طرح‌های اختلاط از ۷ روز تا ۹۰ روز به طور پیوسته افزایش یافته است که این موضوع نشان‌دهنده پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان و تشکیل محصولات هیدراتاسیون قوی‌تر در گذر زمان است. این روند طبیعی و مورد انتظار در بتن و ملات‌های سیمانی است.
- بیشترین افزایش مقاومت نسبت به سن ۷ روز در سن ۹۰ روز مشاهده می‌شود که بیانگر بهبود قابل توجه خواص مکانیکی در دوره‌های عمل‌آوری بلندمدت است.

افزودن نانوذرات و الیاف به ترکیب بتن به‌منظور بهبود خواص مکانیکی آن، از جمله مقاومت فشاری، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. نانوتیتانیوم دی‌اکسید (NanoTiO2) به دلیل خواص کاتالیزوری و توانایی بهبود ریزساختار بتن، و الیاف شیشه به دلیل افزایش مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری بتن، از افزودنی‌های پرکاربرد در این حوزه هستند. با این حال، اثر متقابل این دو افزودنی بر مقاومت فشاری بتن، به‌ویژه در سنین مختلف، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است .

در این مطالعه، برای بررسی اثر نانوتیتانیوم و الیاف شیشه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، از تحلیل رگرسیون غیرخطی استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌های مدل‌های خطی در ثبت روابط پیچیده بین متغیرها، مدل غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم انتخاب شد تا اثرات خطی، غیرخطی و تعاملی نانوتیتانیوم و الیاف شیشه را مدل‌سازی کند. داده‌های این پژوهش شامل ۱۰ طرح اختلاط با مقادیر مختلف نانوتیتانیوم (۰.۵ تا ۱ درصد وزن سیمان) و الیاف شیشه (۰.۲ تا ۰.۵ درصد وزن بتن) است. هدف این تحلیل، ارزیابی معناداری اثرات نانوتیتانیوم، الیاف شیشه و تعامل آن‌ها بر مقاومت فشاری و ارائه بینش‌هایی برای بهینه‌سازی ترکیب بتن است. نتایج این تحلیل، همراه با نمودارهای تعاملی، امکان بررسی بصری و آماری روابط بین متغیرها را فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی بتن با عملکرد بهبودیافته مورد استفاده قرار گیرد.

بعد از انجام تحلیل عاملی بین داده ها نمودار زیر شکل ۴ حاصل شده است.



شکل ۴: نتایج تحلیل عاملی بین متغیرهای الیاف و نانوتیتانیوم

نتایج حاصل از تحلیل عاملی به شرح زیر است:

$$y \sim b1 + b2 \times x1 + b3 \times x2 + b4 \times x1 \times x2$$

مدل غیرخطی استفاده‌شده به صورت زیر است:

$$Strength = b1 + b2 \cdot NanoTiO2 + b3 \cdot GlassFiber + b4 \cdot NanoTiO22 + b5 \cdot GlassFiber2 + b6 \cdot NanoTiO2 \cdot GlassFiber$$

که در آن:

x1 = NanoTiO2(درصد نانوتیتانیوم)

x2 = GlassFiber(درصد الیاف شیشه)

y = Strength(مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مگاپاسکال)

جدول ۲ ضرایب شامل ۶ پارامتر است:

جدول ۱: ضرایب رابطه پیشنهادی

ضریب	اثر	مقدار ضریب	مقدارp	معنی آماری
b1	ثابت	۴۴/۵۴۶	۰/۳۸۸۶۲	از نظر آماری معنادار نیست
b2	اثر خطی نانوتیتانیوم	۶۳/۸۰۸	۰/۵۸۶۶۹	از نظر آماری معنادار نیست
b3	اثر خطی الیاف شیشه	-۷۷/۷۸۳	۰/۶۹۴۱۸	از نظر آماری معنادار نیست
b4	اثر غیرخطی نانوتیتانیوم^2	۱/۱۱۰۹	۰/۹۹۰۰۸	از نظر آماری معنادار نیست
b5	اثر غیرخطی الیاف شیشه^2	۲۸۱/۲۶	۰/۲۹۰۳۷	از نظر آماری معنادار نیست
b6	اثر تعاملی نانوتیتانیوم × الیاف شیشه	-۱۳۳/۲۶	۰/۴۲۹۸۵	از نظر آماری معنادار نیست (اثر مستقل است)

نمودار تعاملی :این نمودار مقاومت فشاری را برای هر سطح الیاف شیشه (۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵ درصد) در مقابل درصد نانوتیتانیوم نشان می‌دهد. اگر خطوط در نمودار تقریباً موازی باشند، این تأیید می‌کند که تعامل بین نانوتیتانیوم و الیاف شیشه معنادار

نیست (مطابق با p = ۰/۴۲۹۸۵). اگر خطوط غیرموازی باشند، ممکن است نشانه‌ای از تعامل وجود داشته باشد، اما چون p-value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است، این تعامل از نظر آماری معنادار نیست.

با وجود اینکه داده‌های مقاومت فشاری و کششی به‌صورت کامل گزارش شده‌اند، تحلیل اولیه بیشتر جنبه توصیفی داشته و نیاز به تبیین ارتباط بین ریزساختار و رفتار مکانیکی بتن دارد. بررسی رفتار بتن‌های حاوی نانو TiO_2 و الیاف شیشه نشان می‌دهد که بهبود مقاومت‌ها تنها ناشی از نتایج آزمایشگاهی نیست، بلکه از تغییرات اساسی در ریزساختار بتن نیز تأثیر می‌پذیرد. هرچند در این پژوهش آزمون‌های SEM یا XRD انجام نشده، اما بر اساس شواهد تجربی به‌دست‌آمده و یافته‌های پژوهش‌های مشابه، می‌توان سازوکارهای ریزساختاری اثرگذار بر مقاومت را به روشنی تفسیر کرد.

نانو TiO_2 به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات و سطح ویژه بالا نقش مهمی در فرآیند هیدراتاسیون ایفا می‌کند. حضور این نانوذرات موجب ایجاد مراکز هسته‌زایی بیشتر برای تشکیل محصولات C–S–H شده و در نتیجه ساختار خمیر سیمان متراکم‌تر و کم‌تخلخل‌تر می‌شود. این رفتار در مطالعات میکروسکوپی پیشین به صورت کاهش حفرات موئینه، افزایش چسبندگی بین خمیر و سنگدانه و کاهش ترک‌های ریز گزارش شده است. بنابراین افزایش مقاومت فشاری مشاهده‌شده در طرح‌های حاوی نانو TiO_2 را می‌توان ناشی از کاهش تخلخل، یکنواختی بیشتر ماتریس سیمانی و بهبود پیوستگی ریزساختار دانست.

از سوی دیگر، الیاف شیشه با عملکرد مکانیکی متفاوتی موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن می‌شوند. الیاف در مقیاس ریز، نقش مسیرهای انتقال تنش را ایفا کرده و از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کنند. مکانیزم پل‌زنی ترک که در تصاویر SEM پژوهش‌های مشابه مشاهده شده، منجر به افزایش چقرمگی، تأخیر در گسترش ترک و بهبود تاب‌آوری بتن در برابر بارهای کششی و فشاری می‌شود. این رفتار در سنین بالاتر اثر بیشتری دارد، زیرا با تکامل هیدراتاسیون، چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی نیز بهبود می‌یابد.

با ترکیب این دو افزودنی، رفتار بتن تحت تأثیر دو سازوکار مکمل قرار می‌گیرد: نانو TiO_2 موجب اصلاح ریزساختار و متراکم‌سازی ماتریس می‌شود، در حالی که الیاف شیشه با جلوگیری از انتشار ترک‌ها، نقش تقویتی در ناحیه پس از ترک‌خوردگی ایفا می‌کنند. تحلیل‌های آماری این پژوهش نیز نشان داد که گرچه اثر تعاملی این دو ماده از نظر آماری معنادار نیست، اما اثر تجمیعی آن‌ها باعث افزایش قابل توجه مقاومت مکانیکی می‌شود.

با وجود اینکه تحلیل‌های اولیه نشان‌دهنده روند افزایش مقاومت فشاری و کششی در طرح‌های مختلف است، مقایسه عددی این نتایج با پژوهش‌های پیشین نیز ضروری است تا جایگاه یافته‌های حاضر در ادبیات علمی مشخص شود. نتایج این مطالعه نشان داد که طرح بهینه (طرح ۹) در مقایسه با طرح پایه، حدود ۲۴ تا ۲۵ درصد افزایش مقاومت کششی و حدود ۲۴ درصد افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ تا ۹۰ روز را تجربه کرده است. این مقادیر با دامنه گزارش‌شده در مطالعات قبلی تطابق کامل دارد و حتی در برخی موارد در محدوده بالاتری قرار می‌گیرد. در مطالعات دیگران [۲۵, ۲۹, ۳۰]، افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی را برای بتن حاوی نانو TiO_2 در مقادیر ۰.۵ تا ۱ درصد اضافه‌شده گزارش کرده‌اند . همچنین نظری و همکاران در سال ۲۰۱۱ نشان داده‌اند که افزودن ۱ درصد نانو TiO_2 می‌تواند مقاومت کششی را ۱۵ تا ۲۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. این مقادیر کمتر از افزایش ثبت‌شده در طرح ۹ این تحقیق است که می‌تواند نشانه عملکرد پایدارتر و توزیع یکنواخت‌تر نانوذرات در ترکیب آزمایش حاضر باشد [۳۱].

در زمینه الیاف شیشه نیز نتایج مطالعات منتشرشده ارتقای مقاومت کششی را در بازه ۱۰ تا ۳۰ درصد گزارش کرده‌اند [۲۵, ۳۰, ۳۲, ۳۳]. افزایش حدود ۲۵ درصدی ثبت‌شده در این مطالعه کاملاً در این محدوده قرار دارد و با مطالعاتی که از الیاف ۰.۳ تا ۰.۵ درصد حجمی استفاده کرده‌اند سازگار است. این مقایسه عددی نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از نانو TiO_2 و الیاف شیشه موجب ایجاد یک اثر تجمعی شده است؛ اثری که اگرچه از نظر آماری هم‌افزایی معناداری نشان نداده، اما از نظر مکانیسمی منجر به بهبود هم‌زمان چگالی ماتریس سیمانی و کنترل ریزترک‌ها شده و افزایش بیشتری نسبت به استفاده منفرد هرکدام ایجاد کرده است.

مقایسه روند افزایشی مقاومت در بازه زمانی ۷ تا ۹۰ روز نیز نشان می‌دهد که افزایش ۵۰ تا ۵۵ درصدی ثبت‌شده در این تحقیق مطابق با گزارش‌های ۴۰ تا ۶۰ درصدی موجود در ادبیات است. مطالعاتی نیز گزارش کرده‌اند که نانو TiO_2 با تسریع هیدراتاسیون در سنین

اولیه و پر کردن حفرات موئینه در سنین میانی، بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت‌های میان‌مدت دارد [۲۵, ۳۳-۳۵]. همچنین اثر تقویتی الیاف شیشه در سنین بالاتر، با کنترل گسترش ترک‌ها و افزایش چقرمگی، علت تفاوت عملکرد طرح‌های مختلف این مطالعه است.

به‌طور کلی، مقایسه عددی نتایج این پژوهش با گزارش‌های معتبر موجود نشان می‌دهد که یافته‌های این مقاله نه‌تنها در محدوده قابل انتظار مطالعات پیشین قرار دارد، بلکه در برخی موارد عملکرد بهتری نیز ارائه می‌دهد. این هم‌راستایی عددی و مکانیسمی، اعتبار نتایج را تقویت کرده و جایگاه علمی مطالعه را در میان پژوهش‌های مرتبط با بتن حاوی نانو TiO_2 و الیاف شیشه تثبیت می‌کند.

اگرچه نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن، به‌ویژه از طریق تنظیم مقادیر نانوتیتانیوم و الیاف شیشه، به‌طور قابل‌توجهی موجب افزایش مقاومت کششی و بهبود رفتار مکانیکی بتن می‌شود، اما بیان کاربردهای عملی این بهینه‌سازی در صنعت نیز ضروری است. در واقع، هدف از بهینه‌سازی طرح اختلاط تنها ارتقای مشخصات مکانیکی در مقیاس آزمایشگاهی نیست، بلکه فراهم‌کردن زمینه‌ای برای استفاده مؤثر از این دستاوردها در پروژه‌های واقعی عمرانی است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌طور مستقیم در فرآیند طراحی و تولید بتن‌های توانمند با دوام بالا مورد استفاده قرار گیرد؛ به‌ویژه در سازه‌هایی که نیازمند عملکرد کششی و مقاومتی قابل‌اتکا هستند، مانند دال‌های بتنی، قطعات پیش‌ساخته، دیوارهای باربر سبک، اجزای تحت بارهای ضربه‌ای یا ارتعاشی، و بخش‌هایی که در معرض خستگی یا ترک‌خوردگی‌های تدریجی قرار دارند.

بهینه‌سازی نسبت نانوتیتانیوم و الیاف شیشه می‌تواند برای شرکت‌های تولید بتن آماده، واحدهای اجرایی و طراحان سازه، به‌عنوان یک راهکار عملی جهت کاهش هزینه‌های تعمیر، افزایش دوام سازه و بهبود عملکرد بلندمدت بتن به‌کار رود. همچنین، پروژه‌هایی که به دلیل شرایط محیطی یا بارگذاری خاص با چالش ترک‌خوردگی، جمع‌شدگی، یا افت مقاومت روبه‌رو هستند، می‌توانند از طرح‌های بهینه‌شده ارائه‌شده در این تحقیق بهره‌مند شوند. کاهش میزان ترک‌های اولیه، افزایش انسجام ریزساختار و بهبود رفتار کششی بتن از جمله نتایج مستقیم استفاده از چنین طرح‌های اختلاطی است که نهایتاً به افزایش عمر مفید سازه، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقای پایداری زیست‌محیطی منجر می‌شود.

از این منظر، یافته‌های پژوهش حاضر نه تنها در سطح آزمایشگاهی اهمیت دارد، بلکه قابلیت انتقال به صنعت ساخت‌وساز را نیز داشته و می‌تواند مبنایی برای تدوین دستورالعمل‌های جدید در حوزه بتن توانمند حاوی نانوذرات و الیاف باشد. به‌طور خلاصه، بهینه‌سازی طرح اختلاط در این مطالعه دارای کارکردی کاملاً کاربردی است و می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد موثر در افزایش دوام، عملکرد مکانیکی و کاهش هزینه‌های چرخه عمر سازه‌های بتنی به کار گرفته شود.

۵- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه پارامترهای مختلف بر رفتار مکانیکی ملات یا بتن است. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها به طور پیوسته افزایش یافت که این امر ناشی از تکمیل فرآیند هیدراتاسیون و تشکیل محصولات سخت‌کننده در ساختار سیمان است. همچنین، افزودن مواد تکمیلی مانند نانوذرات یا خاکستر بادی موجب بهبود مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد گردید. این افزایش مقاومت به دلیل عملکرد تسریع‌کننده و پرکننده نانوذرات است که باعث بهبود چگالی و کاهش تخلخل ساختار می‌شود. مقاومت کششی ارائه‌شده برای طرح‌های مختلف و سنین مختلف، نشان‌دهنده روند افزایشی مقاومت کششی با گذشت زمان است که به دلیل ادامه واکنش هیدراسیون سیمان و سخت شدن تدریجی بتن رخ می‌دهد.

نتایج مدل‌سازی چندجمله‌ای درجه دو برای مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف نشان می‌دهد که تأثیر متغیرهای درصد نانو تیتانیوم دی‌اکسید (x1) و درصد الیاف شیشه (x2) به صورت ترکیبی و غیرخطی بر مقاومت کششی بتن توانمند وجود دارد. ضرایب به دست آمده در معادلات زیر بیانگر این اثرات هستند:

مقاومت کششی ۷ روزه:

$$y = 2.480 + 2.939x1 - 3.477x2 - 0.485x12 + 10.666x22 - 4.114x1x2y$$

مقاومت کششی ۱۴ روزه:

$$y = 3.023 + 3.711x1 - 3.788x2 - 0.693x12 + 12.507x22 - 5.180x1x2y$$

مقاومت کششی ۲۸ روزه:

$$y = 3.818 + 3.610x1 - 4.587x2 - 0.132x12 + 15.365x22 - 6.669x1x2y$$

مقاومت کششی ۹۰ روزه:

$$y = 3.704 + 4.564x1 - 5.804x2 - 1.080x12 + 15.890x22 - 4.972x1x2y$$

که در آن:

x1درصد وزنی نانو TiO_2 نسبت به سیمان

x2درصد وزنی الیاف شیشه نسبت به وزن بتن

yمقاومت کششی پیش‌بینی‌شده به مگاپاسکال است.

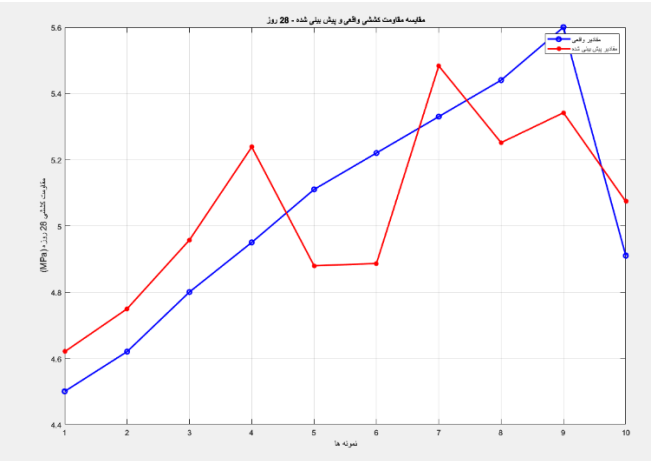
ضرایب مثبت و منفی برای پارامترهای خطی و درجه دوم نشان می‌دهد که هر دو مواد افزودنی تأثیر قابل توجه اما پیچیده‌ای روی مقاومت کششی دارند.

به طور کلی افزایش درصد نانو TiO_2 باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود (ضرایب مثبت x1در اغلب مدل‌ها).

درصد الیاف شیشه به شکل غیرخطی و با تاثیر متقابل بر نانو TiO_2 بر مقاومت موثر است؛ به‌خصوص ضرایب بزرگ مثبت x_2^2 نشان‌دهنده اثر مهم الیاف شیشه در بهبود مقاومت کششی هستند.

ضرایب متقاطع منفی x1x2حاکی از تعامل منفی احتمالی در برخی شرایط بین نانو TiO_2 و الیاف شیشه می‌باشند که می‌تواند به دلیل تغییرات ساختاری یا پراکندگی در ماتریس بتن باشد.

خطای میانگین مربعات در محدوده ۰/۰۲۱۳ تا ۰/۰۴۵۶ است که نشان‌دهنده برازش قابل قبول مدل به داده‌های آزمایشی است. بهترین پیش‌بینی در سنین اولیه و پایانی بتن با خطاهای پایین مدل به دست آمده است. شکل ۵ برازش بین داده های آزمایشگاهی و رابطه پیشنهادی برای کشش انجام شده است.



شکل ۵: برازش بین داده های آزمایشگاهی و رابطه پیشنهادی برای کشش

۶- نتیجه گیری

۱. نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن برای ده طرح اختلاط مختلف نشان داد که تمامی نمونه‌ها با افزایش سن عمل‌آوری، روندی ثابت و صعودی در مقاومت کششی تجربه می‌کنند که ناشی از ادامه فرآیند هیدراتاسیون و تکامل ریزساختار بتن است. مقادیر حاصل شده در سن ۷ روزه بین ۳/۰۸ تا ۳/۸۴ مگاپاسکال و در سن ۹۰ روزه بین ۴/۶۲ تا ۵/۷۷ مگاپاسکال قرار گرفت. این افزایش، بسته به نوع طرح، در بازه ۴۷ تا ۵۳ درصد تغییر داشته و بیانگر بهبود قابل توجه خواص مکانیکی بتن در دوره عمل‌آوری است.

۲. بررسی طرح‌های اختلاط نشان داد که اختلاف بین ضعیف‌ترین و قوی‌ترین طرح‌ها در سنین مختلف تقریباً ثابت بوده و در حدود ۲۴ تا ۲۵ درصد باقی می‌ماند. این امر نشان می‌دهد که تأثیر نوع ترکیب اختلاط بر مقاومت کششی، نه‌تنها در سنین اولیه بلکه در دوره بلندمدت نیز پایدار است. در میان طرح‌ها، مخلوط دارای بالاترین درصد نانوتیتانیوم و الیاف شیشه عملکرد بهتری ارائه داد؛ در مقابل، طرح پایه با مقادیر حداقلی افزودنی‌ها کمترین مقاومت را ثبت کرد. این اختلاف عملکرد نشان می‌دهد که تنظیم درصدهای نانوتیتانیوم و الیاف شیشه نقش مستقیم و قابل توجهی در بهبود ظرفیت کششی بتن دارد.

۳. به‌صورت کلی، نتایج بیانگر آن است که طراحی دقیق و هدفمند طرح اختلاط، به‌ویژه در انتخاب نسبت مناسب از افزودنی‌های نانوتیتانیوم و الیاف شیشه، عامل کلیدی در دستیابی به بتن با مقاومت کششی بالاتر و رفتار مکانیکی مطلوب است. این یافته‌ها نشان‌دهنده ضرورت توجه به اصلاح ترکیب اجزاء به‌منظور افزایش کارایی مکانیکی بتن و بهبود عملکرد سازه‌ای در کاربردهای مهندسی است.

مراجع

1. Srivastava, A., A. Mishra, and S.K. Singh, *Effect of nano TiO2 and reinforcement of polypropylene fiber in standard concrete: an experimental and numerical approach.* Canadian Journal of Civil Engineering, 2025. **52**(5): p. 929–945.
2. Shahrajabian, H. and H. Vaezzadeh, *The nano-clay effect on the improvement of the thermal, flammability, and mechanical behavior of epoxy/glass fiber/ATH hybrid composites.* Journal of Composite Materials, 2024. **58**(23): p. 2545–2554.
3. Alsaif, N.A., et al., *The impact of TiO2 on physical, optical characteristics and shielding qualities against γ-ray features of titanium bismo-borate glasses.* Optical and Quantum Electronics, 2024. **56**(5): p. 816.
4. Nabil, I.M., et al., *Lithium magnesium borosilicate glass: the impact of alternate doping with nano copper oxide and nano hematite on its structural, optical, and nuclear radiation shielding characteristics.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024. **35**(12): p. 826.
5. Velmurugan, G., et al., *EXPLORING THE SYNERGY: NANO SIO2 REINFORCEMENT IN BASALT FIBER EPOXY COMPOSITES FOR IMPROVED TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES.* Journal of the Balkan Tribological Association, 2024. **30**(2).
6. Alsaif, N.A., et al., *Effect of titanium ion doping on γ-ray shielding, structure and dielectric characteristics of glasses made of barium zinc borate.* Optical and Quantum Electronics, 2024. **56**(7): p. 1098.
7. Bal, S. and N.A. Rani, *Next generation building materials for energy efficiency and climate responsive design.* Discover Applied Sciences, 2025. **7**(8): p. 796.
8. Saxena, S. and H. Sharma, *Prediction and assessment of optimal concrete compositions for overall radiation protection and reduced global warming potential.* Scientific Reports, 2025. **15**(1): p. 5785.
9. Al-Saleh, W.M., et al., *A comprehensive study of the shielding ability from ionizing radiation of different mortars using iron filings and bismuth oxide.* Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 10014.

10. Alsaif, N.A., et al., *Dielectric, optical properties, γ-ray/neutron shielding capacity of bismo-borate glasses reinforced with CeO2.* Applied Physics A, 2025. **131**(1): p. 45.
11. Jain, M. and S. Patil, *A review on materials and performance characteristics of polymer gears.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023. **237**(12): p. 2762–2790.
12. Astarlıoğlu, A.T., *Aerospace Metamaterials and Functional Coatings*. 2025, Bilkent Universitesi (Turkey).
13. Ramazanoğlu, D., et al. *Dielectric property enhancement of glass fiber-reinforced concrete via TiO_2 nanocomposites*. in *Structures*. 2025. Elsevier.
14. Maraş, M.M., *Mechanical and fracture behavior of geopolymer composites reinforced with fibers by using nano-TiO2.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021. **43**(9): p. 412.
15. Sastry, K.G.K., P. Sahitya, and A. Ravitheja, *Influence of nano TiO2 on strength and durability properties of geopolymer concrete.* Materials Today: Proceedings, 2021. **45**: p. 1017–1025.
16. Ahmed, M.K., et al., *Improved mechanical properties of the E-glass fibres through TiO2 nanoparticle coating.* Materials Science and Technology, 2023. **39**(11): p. 1304–1312.
17. Najaf, E., M. Orouji, and S.M. Zahrai, *Improving nonlinear behavior and tensile and compressive strengths of sustainable lightweight concrete using waste glass powder, nanosilica, and recycled polypropylene fiber.* Nonlinear Engineering, 2022. **11**(1): p. 58–70.
18. Wei, X., W. Xiaoqing, and L. Chunmei, *Effect of nano-TiO2 and polypropylene fiber on mechanical properties and durability of recycled aggregate concrete.* International Journal of Concrete Structures and Materials, 2024. **18**(1): p. 28.
19. Nayak, R.K., K.K. Mahato, and B.C. Ray, *Water absorption behavior, mechanical and thermal properties of nano TiO2 enhanced glass fiber reinforced polymer composites.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. **90**: p. 736–747.
20. Baikerikar, A.V., et al., *Synergistic effects of nano titanium dioxide and waste glass powder on the mechanical and durability properties of concrete.* Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 27573.
21. Saradar, A., et al., *Investigating the properties and microstructure of high-performance cement composites with nano-silica, silica fume, and ultra-fine TiO2.* Innovative Infrastructure Solutions, 2024. **9**(4): p. 84.
22. Daniyal, M., S. Akhtar, and A. Azam, *Effect of nano-TiO2 on the properties of cementitious composites under different exposure environments.* Journal of Materials Research and Technology, 2019. **8**(6): p. 6158–6172.
23. Abdullah, M. and E. Jallo, *Mechanical properties of glass fiber reinforced concrete.* Al-Rafidain Engineering Journal, 2012. **20**(5): p. 128–135.
24. Yuan, Z. and Y. Jia, *Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study.* Construction and Building Materials, 2021. **266**: p. 121048.
25. Orakzai, M.A., *Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on Mechanical properties of concrete.* Case studies in construction materials, 2021. **14**: p. e00483.
26. Wu, C., et al., *Effect of fiber content on mechanical properties and microstructural characteristics of alkali resistant glass fiber reinforced concrete.* Advances in Materials Science and Engineering, 2022. **2022**(1): p. 1531570.
27. Desai, T., et al., *Mechanical properties of concrete reinforced with AR-glass fibers*, in *Brittle Matrix Composites 7*. 2003, Elsevier. p. 223–232.
28. Dean, A. and D. Voss, *Design and analysis of experiments*. 1999: Springer.
29. Jenima, J., et al., *A comprehensive review of titanium dioxide nanoparticles in cementitious composites.* Heliyon, 2024. **10**(20).
30. Nisar, N., et al., *Enhancing concrete properties with nano-SiO2 and nano-TiO2: a review.* Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2025. **10**(2): p. 2496613.
31. Nazari, A. and S. Riahi, *The effect of TiO2 nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete.* Materials Science and Engineering: A, 2010. **528**(2): p. 756–763.
32. Döndüren, M.S. and M.G. Al-Hagri, *A review of the effect and optimization of use of nano-TiO2 in cementitious composites.* Research on Engineering Structures and Materials, 2022. **8**(2): p. 283–305.

33. Luo, Q.-H. and S.-E. Fang, *Influence of ultrafine metakaolin and nano-TiO_2 on the durability and microstructure of seawater sea-sand concrete.* Construction and Building Materials, 2025. **473**: p. 140978.
34. Jing, Y., et al., *Shear performance evaluation of sustainable concrete beams containing rice husk ash and carbon nanotubes as cement replacement.* PLoS One, 2025. **20**(6): p. e0320325.
35. Ardi, S.M. and H.A. Büyüktaşkin, *A review on the influence of nano TiO2 and. silica fume on hydrophobic characteristics of the concrete.* 2023.