



University Of Qom



Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Steel Fibers

Seyed Komeil Hashemi^{1✉}, Seyed Reza Mirbozorgi²

1. Corresponding Author, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. Email: k.hashemi@nit.ac.ir
2. Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. Email: Rezamirbozorgi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 Mar 2025
Revised 03 Jul 2025
Accepted 08 Jul 2025
Published 11 Jul 2025

Keywords:
Light-weight Concrete,
Steel Fiber,
LECA,
Fire,
Mechanical Properties.

ABSTRACT

Nowadays, the growth of building construction and the need of lighter but more performance materials are of interest. Adding to, fire incidents highlight the insufficient knowledge of the post fire material properties. Concrete should maintained to resist more and lost less mechanical properties when subjected to high temperatures. Hence, this study investigates the effects of elevated temperatures on the mechanical properties of lightweight concrete containing different volumetric percentage of steel fibers. Specimens were exposed to ambient temperature (25°C), 300°C, and 600°C. Results indicated that increasing the temperature to 300°C led to a relative improvement in compressive and tensile strength. However, at 600°C, a significant degradation in mechanical properties was observed. At 300°C, compressive and tensile strength increased by 12% and 8%, respectively. Conversely, at 600°C, compressive strength decreased by 45%, elastic modulus by 50%, and ultrasonic pulse velocity by 35%. Specimens with 1% steel fibers exhibited optimal performance at 300°C. These findings underscore the necessity of optimizing concrete mixtures with heat-resistant fibers to enhance durability under high-temperature conditions. The achievements of this research not only enhance structural fire safety but are also considered a significant step towards sustainable development by promoting the replacement of conventional dense materials with lightweight concrete.

Cite this article: Hashemi SK, Mirbozorgi SR. Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Steel Fibers. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 1-16. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12611.1613>



Introduction

In concrete structure design, high weight is a critical challenge, driving efforts to reduce dead loads. Lightweight concrete (LWC) using porous aggregates (e.g., LECA) offers an effective solution. While maintaining adequate mechanical strength (1–60 MPa), LWC provides lower density (300–2000 kg/m³), enhanced thermal insulation (conductivity: 0.2–1.0 W/m·K), and improved durability. However, it faces two key drawbacks: high water absorption (12–14%) and temperature sensitivity. Adding steel fibers (SFRC) as a complementary strategy boosts toughness, tensile strength (up to 47%), and crack control. Yet, research indicates the behavior of LWC-SFRC composites under extreme temperatures (>500°C) remains poorly understood. Existing data focus predominantly on compressive strength, neglecting simultaneous impacts on tensile strength, microstructural changes (via SEM analysis), and fiber dosage effects. This knowledge gap has hindered the development of robust fire-resistance design standards.

Methodology

This study utilized LECA lightweight aggregate (produced by Leca Iran) as coarse aggregate, with a maximum particle size of 9.5 mm and a specific gravity of 1200 kg/m³ measured per ASTM C127. Fine aggregate consisted of natural sand from Babol (density: 2540 kg/m³, fineness modulus: 2.6 per ASTM C136). Type II cement from Mazandaran Cement Plant and hooked-end steel fibers (50 mm length, 0.8 mm diameter, aspect ratio 62.5) were employed. The initial mix design followed ACI 211-2-98 for lightweight concrete, targeting a 28-day compressive strength of 25 MPa.

Cylindrical specimens (100 × 200 mm) were prepared according to ASTM C31. Moisture content of materials was pre-calculated, and mix water was adjusted accordingly. Workability was controlled via slump tests (ASTM C143), maintaining 80–90 mm using superplasticizers. For tensile strength evaluation, samples were tested per ASTM C496 at 25°C, 300°C, and 600°C with three

fiber volumes (0.5%, 1%, 1.5%). Compressive strength and elastic modulus were assessed under identical conditions using ASTM C469.

Results

Initial temperature rise to 300°C improved compressive and tensile strength due to free water evaporation and enhanced cement matrix densification. However, at 600°C, significant degradation occurred in compressive strength, elastic modulus, and strain capacity, primarily attributed to C-S-H gel deterioration and weakened fiber-matrix bonding. Increasing steel fiber content to 1% enhanced mechanical properties at lower temperatures and improved performance at 300°C. Conversely, 1.5% fiber volume caused adverse effects: fiber clustering created structural weaknesses, increasing porosity, reducing matrix homogeneity, inducing stress concentration, and lowering workability. While all samples exhibited reduced mechanical properties at 600°C, those with higher fiber content maintained relatively better performance due to improved stress distribution and crack mitigation. Ultrasonic pulse velocity (UPV) tests revealed a direct correlation with mechanical strength. At ambient temperature, higher fiber content increased UPV, indicating improved quality.

Conclusion

This study provides critical insights into the high-temperature performance (25–600°C) of steel-fiber-reinforced lightweight aggregate concrete (LWC). Key innovations reveal that 1% vol. steel fibers optimize mechanical properties at ≤300°C, enhancing tensile strength by 31% and compressive strength by 25% compared to plain LWC through improved matrix densification. Conversely, 1.5% vol. fibers induce detrimental clustering, generating structural defects (pores, stress concentrations) that reduce workability and integrity. At 600°C, severe degradation occurs—compressive strength declines by 40–60% and elastic modulus by 55%—driven primarily by C-S-H gel decomposition and fiber-matrix bond deterioration, validated via microstructural analysis. Pioneering correlations between ultrasonic pulse velocity (UPV) and

mechanical properties under thermal exposure are established: UPV reductions of 30–50% at 600°C ($R^2 > 0.91$) directly reflect interfacial bond failure, enabling non-destructive health monitoring in fire-affected structures. These findings yield practical design solutions, including the validation of 1% fiber volume as a critical threshold for fire-resilient LWC ($\leq 300^\circ\text{C}$) and quantified strength-retention limits beyond 500°C to inform code updates.

Funding Statement

This research project has been conducted using the special research grants (Grant) from Babol Noshirvani University of Technology, under project number **1143/M/P**.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing

financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Seyed Komeil hashemi:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing–original draft; Writing–review & editing.

Seyed Reza mirbozorgi:

Conceptualization; Data curation; Methodology; Writing



بررسی آزمایشگاهی تأثیر حرارت بر مشخصات مکانیکی بتن‌های سبک حاوی الیاف فولادی

سید کمیل هاشمی^۱، سید رضا میربزرگی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: k.hashemi@nit.ac.ir

۲. دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: Rezamirbozorgi@gmail.com

چکیده

امروزه، رشد ساخت و ساز ساختمان و نیاز به مصالح سبک‌تر اما با عملکرد بهتر مورد توجه محققین می‌باشد. آتش‌سوزی‌های رخ داده در دهه‌های اخیر نیز کمبود اطلاعات لازم در مورد خواص مصالح پس از آتش‌سوزی را برجسته می‌کند. بتن باید برای نقصان خواص مکانیکی کمتر زمانی که در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، آماده شود. بنابراین این پژوهش تأثیر دمای بالا بر ویژگی‌های مکانیکی بتن سبک حاوی الیاف فولادی با درصدهای حجمی مختلف را بررسی می‌کند. نمونه‌ها در معرض دمای محیط (۲۵ درجه سلسیوس)، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و مشخصات مکانیکی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس منجر به بهبود نسبی در مقاومت فشاری و کششی شد. با این حال، در ۶۰۰ درجه سلسیوس، تخریب قابل توجهی در خواص مکانیکی مشاهده گردید. در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۱۲ و ۸ درصد افزایش یافت. در مقابل، در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری ۴۵٪، مدول الاستیسیته ۵۰ درصد و سرعت پالس فراصوت ۳۵ درصد کاهش یافت. نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس عملکرد بهینه‌ای از خود نشان دادند. این یافته‌ها بر ضرورت بهینه‌سازی مخلوط‌های بتن با الیاف مقاوم به حرارت برای افزایش دوام در شرایط دمای بالا تأکید می‌کنند. دستاوردهای این تحقیق نه تنها ایمنی سازه‌ها در برابر آتش را افزایش می‌دهد، بلکه با ترویج جایگزینی مواد متراکم متعارف با بتن سبک، گامی مهم در جهت توسعه پایدار محسوب می‌شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

کلیدواژه‌ها:

بتن سبک،
الیاف فولادی،
لیکا،
حریق،
مشخصات مکانیکی.

استناد: هاشمی سید کمیل، میربزرگی سید رضا. بررسی آزمایشگاهی تأثیر حرارت بر مشخصات مکانیکی بتن‌های سبک حاوی الیاف فولادی.

پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۱-۱۶. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12611.1613>



۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های بتنی، وزن بالا همواره به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در نظر گرفته می‌شود و تلاش‌های متعددی برای کاهش بار مرده سازه‌ها صورت پذیرفته است. یکی از راهکارهای مؤثر در این زمینه، استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک است که به دلیل ساختار متخلخل و وجود منافذ هوا، موجب کاهش چشمگیر وزن بتن می‌گردند. بتن‌های ساخته‌شده با این سنگ‌دانه‌ها، ضمن حفظ مقاومتی مشابه بتن‌های معمولی، از چگالی پایین‌تری برخوردارند و بهبودهایی در دوام و خاصیت عایق‌بندی حرارتی نیز از خود نشان می‌دهند [۱]. بر اساس تعاریف استاندارد، بتن‌های سبک در محدوده چگالی ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار می‌گیرند [۲]. مقایسه‌ای بین خواص مکانیکی و حرارتی بتن سبک و بتن معمولی نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن سبک در محدوده ۱ تا ۶۰ مگاپاسکال و رسانایی حرارتی آن بین ۰/۲ تا ۱/۰ وات بر متر-کلوین است، درحالی‌که این مقادیر برای بتن معمولی به ترتیب ۱۵-۱۰۰ مگاپاسکال و ۱/۶-۱/۹ وات بر متر-کلوین گزارش شده است [۲]. روش‌های تولید بتن سبک شامل حذف سنگ‌دانه‌های ریز، ایجاد حباب هوا و جایگزینی سنگ‌دانه‌های سنگین با مواد سبک‌تر است [۲]. تعریف بتن سبک در استانداردهای کشورهای مختلف متفاوت است. به‌عنوان مثال، در استرالیا بتن با چگالی کمتر از ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به‌عنوان بتن سبک شناخته می‌شود [۳]، درحالی‌که این مقدار در نروژ ۱۲۰۰-۲۲۰۰ و در آمریکا کمتر از ۱۸۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شده است [۴،۵]. مواد اولیه مانند رس، اسلیت و شیل با فرایندهای حرارتی به سنگ‌دانه‌های سبک با ساختار شبه سرامیکی تبدیل می‌شوند [۶]. اگرچه چگالی این سنگ‌دانه‌ها پایین است، اما جذب آب آن‌ها (۱۲-۱۴٪) به طور قابل‌توجهی از سنگ‌دانه‌های معمولی (۰/۵-۲٪) بیشتر است [۷]. همچنین، رابطه مستقیمی بین چگالی و مقاومت سنگ‌دانه‌های سبک مشاهده شده است؛ به‌طوری

که افزایش چگالی بتن، مقاومت نهایی آن را بهبود می‌بخشد [۸]. بتن مسلح به الیاف فولادی (SFRC) به دلیل مزایایی مانند جلوگیری از گسترش ترک‌های ماکرو، بهبود شکل‌پذیری و افزایش چقرمگی، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعاتی مانند پژوهش عباس و همکاران [۹] نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی با طول و قطر متفاوت (به‌عنوان مثال ۰/۶۲ و ۰/۷۵ میلی‌متر) و درصد حجمی ۰/۵ تا ۱/۵٪ به بتن، منجر به افزایش ۱۰ الی ۲۵٪ در مقاومت فشاری و ۳۱-۴۷٪ در مقاومت کششی می‌شود. همچنین، افزایش محتوای الیاف از ۰/۵٪ به ۱/۵٪، مقاومت خمشی را تا ۱۴۰٪ بهبود می‌بخشد [۹]. آلتون و همکاران [۱۰] نیز با بررسی تیرهای بتن مسلح سبک، تأثیر مثبت الیاف فولادی را بر ظرفیت باربری و شکل‌پذیری تأیید کردند. با این حال، پژوهش‌هایی مانند مطالعه کاراتلی و همکاران [۱۱] و دو و همکاران [۱۲] نشان می‌دهند که علی‌رغم مزایای ذکرشده، رفتار بتن سبک تحت شرایط حرارتی شدید هنوز به طور کامل شناخته نشده است. همچنین بررسی‌های عددی نقش بسزایی در گسترش داده‌های موجود در زمینه مشخصات بتن‌های سبک و دوست‌دار محیط‌زیست دارند [۱۳-۱۶]. با وجود کاربرد گسترده بتن سبک در سازه‌ها [۱۷]، داده‌های علمی درباره رفتار آن در دماهای بالای ۵۰۰ درجه سلسیوس (به‌ویژه ۶۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه) محدود است. بیشتر مطالعات موجود تنها بر مقاومت فشاری متمرکز شده‌اند، درحالی‌که تغییرات هم‌زمان در مقاومت کششی، تغییرات ریزساختاری (با استفاده از SEM) و تأثیر درصد الیاف فولادی کمتر بررسی شده است. این کمبودها موجب شده است تا استانداردهای طراحی برای بتن سبک مقاوم در برابر حرارت، ناقص باقی بمانند. هدف این پژوهش، بررسی جامع رفتار بتن سبک حاوی لیکا و الیاف فولادی در دماهای بالا و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد آن در شرایط آتش‌سوزی است. این تحقیق نه تنها به افزایش ایمنی سازه‌ها کمک می‌کند، بلکه گامی در راستای توسعه پایدار با کاهش مصرف مصالح سنگین است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

سبکدانه لیکا (تهیه شده از شرکت لیکا ایران) به عنوان درشت دانه در این پژوهش استفاده شد. اندازه حداکثر دانه های این سنگدانه ۹/۵ میلی متر و وزن مخصوص آن مطابق استاندارد ASTM C127 برابر با ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه گیری شد. ماسه مصرفی از شهرستان بابل تأمین گردید که چگالی آن ۲۵۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و

مدول نرمی آن بر اساس استاندارد ASTM C136 معادل ۲/۶ بود. سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان مازندران برای ساخت بتن انتخاب شد. الیاف فولادی دو سر قلاب با طول ۵۰ میلی متر، قطر ۰/۸ میلی متر و نسبت ابعادی ۶۲/۵ میلی متر نیز در این تحقیق به کار رفتند. طرح مخلوط اولیه بر اساس آیین نامه ACI 211-2-98 (مخصوص بتن های سبک) و با مقاومت معیار ۲۸ روزه ۲۵ مگاپاسکال طراحی شد. جزئیات طرح مخلوط در جدول ۱ ارائه شده است.

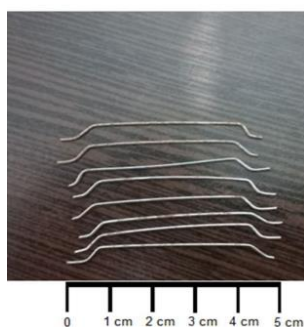
جدول ۱- جزئیات طرح مخلوط مورد بررسی در پژوهش

شماره طرح	W/C	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	لیکا درشت (kg/m ³)	لیکا ریز (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	الیاف (kg/m ³)
۱	۰/۳۷	۱۶۶/۵	۴۵۰	۲۱۰	۱۴۰	۸۵۰	۳۹/۲۵
۲	۰/۳۷	۱۶۶/۵	۴۵۰	۲۱۰	۱۴۰	۸۵۰	۷۸/۵
۳	۰/۳۷	۱۶۶/۵	۴۵۰	۲۱۰	۱۴۰	۸۵۰	۱۵۷

بررسی شدند.

مراحل ساخت بتن مطابق استاندارد ASTM C31 انجام شد. درصد رطوبت مصالح پیش از اختلاط محاسبه و میزان آب طرح مخلوط اصلاح گردید. برای اطمینان از یکنواختی و کارایی بتن، آزمایش اسلامپ (طبق استاندارد ASTM C143) روی تمامی طرح های مخلوط انجام شد. با استفاده از روان کننده، اسلامپ بتن در محدوده ۸۰ تا ۹۰ میلی متر حفظ گردید. شکل ۱ نمای الیاف مصرفی و فرآیند ساخت نمونه ها را نشان می دهد.

برای بررسی مقاومت کششی نمونه ها، نمونه های استوانه ای با ابعاد ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی متر مطابق استاندارد ASTM C496 ساخته شدند. این نمونه ها در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس و با سه درصد حجمی الیاف (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین، ۲۱ نمونه استوانه ای با ابعاد ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی متر بر اساس استاندارد ASTM C469 تحت دماهای ۲۵، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس و با سه درصد حجمی الیاف (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) برای بررسی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) ساخت نمونه بتنی ب) الیاف مصرفی در پژوهش

شرایط حرارتی مختلف، آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم

برای ارزیابی رفتار بتن تحت تنش های کششی در

انجام شد. همچنین، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته با استفاده از دستگاه‌های بارگذاری هیدرولیک مطابق استانداردهای ذکر شده اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری کارایی بتن، آزمایش اسلامپ با تمرکز بر حفظ اسلامپ ثابت برای اطمینان از کیفیت اختلاط انجام گردید. شکل ۲ نمای چینش انجام آزمون مقاومت کششی و تعیین مدول الاستیسیته را نمایش می‌دهد.

۳- یافته‌ها

در این بخش، نکات مهم در تحقیق انجام شده به‌طور خلاصه مرور و نتایج برگرفته از آن تشریح می‌شود.

۳-۱- مقاومت فشاری

براساس داده‌های به‌دست آمده از آزمون مقاومت فشاری (شکل ۳) از نمونه‌های ۹۰ روزه، نمونه‌های بتن سبک حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس افزایش مقاومتی معادل ۱۷/۲۴٪ (از ۲۹ به ۳۴

مگاپاسکال) نشان دادند. این بهبود عملکرد را می‌توان به تراکم ماتریس ناشی از تبخیر آب آزاد و تشکیل پیوندهای ثانویه در اثر حرارت نسبت داد [۲۲]. در مقابل، نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف در همین دما تنها ۴/۱۵٪ افزایش مقاومت (از ۳۱/۳۵ به ۳۲/۶۵ مگاپاسکال) را تجربه کردند، که نشان‌دهنده اشباع اثر الیاف در درصد‌های حجمی بالاست. افزایش دما به ۶۰۰ درجه سلسیوس منجر به کاهش چشمگیر مقاومت فشاری در نمونه‌های با الیاف ۱٪ و ۱/۵٪ شد (به ترتیب ۸/۳۶٪ و ۱۰/۳۷٪). این پدیده با دو مکانیزم کلیدی توضیح داده می‌شود: اول، تجزیه ژل C-H که در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس آغاز می‌شود و در ۶۰۰ درجه سلسیوس به اوج خود می‌رسد [۲۲]. دوم، گسیختگی پیوند الیاف-ماتریس که به دلیل تنش‌های حرارتی ایجادشده در مرز مشترک الیاف و ماتریس، باعث ایجاد ترک‌های ریز و کاهش یکپارچگی ساختاری می‌گردد.



(ب)



(الف)

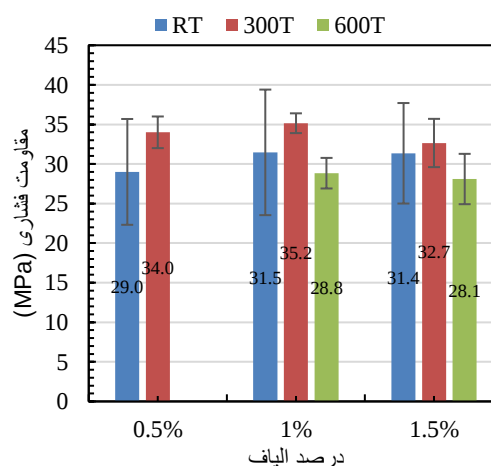
شکل ۲- الف) نمای انجام آزمون کشش غیرمستقیم ب) نمای انجام آزمون تعیین مدول الاستیسیته

ناهمگنی توزیع تنش و کاهش مقاومت شد، که احتمالاً ناشی از ایجاد نقاط تمرکز تنش در اطراف الیاف است. از دیدگاه کاربردی، استفاده از ۱٪ الیاف فولادی همراه با عملیات حرارتی کنترل‌شده (تا ۳۰۰ درجه سلسیوس) می‌تواند بهینه‌ترین عملکرد مکانیکی را تضمین کند.

نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به حداکثر مقاومت فشاری (۳۵/۱۵ مگاپاسکال) دست یافتند، که نشان‌دهنده تعادل بهینه بین اثرات مثبت الیاف (مهار ترک‌ها) و اثرات منفی ناشی از تراکم بیش از حد آن‌هاست. در مقابل، افزودن ۱/۵٪ الیاف منجر به

الیاف فلزی، رفتار نامناسبی در برابر حرارت از خود نشان می‌دهند. به طوری که نمونه‌های بتن سبک حاوی ۰/۵ درصد الیاف فلزی، در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، دچار انفجار شدند. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فلزی می‌تواند تاثیری چشمگیری در تغییر رفتار و مشخصات بتن‌های سبک حاوی لیکا در دماهای بالا شوند. به‌طور کلی دهیدراسیون بتن در دماهای بالای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد باعث تبخیر آب مقید شیمیایی ژل C-S-H می‌شود. دهیدراسیون ژل C-S-H و انبساط حرارتی سنگ‌دانه‌ها در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش تنش داخلی و گسترش میکرو ترک‌ها در سطح ماده می‌شود [۱۸]. کلسیم هیدروکسید که یکی از مهم‌ترین ترکیب‌ها در خمیر سیمان است، در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود که این امر باعث انقباض بتن می‌شود [۱۹]. تأثیرات مخرب حرارت‌های بالا عموماً به‌صورت ترک، قلوه‌کن شدن و تغییر رنگ در سطح بتن قابل مشاهده است [۲۰]. تغییراتی که در بتن در دماهای بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شوند غیرقابل جبران هستند. ژل C-S-H که به‌عنوان ترکیب تقویت‌کننده خمیر سیمان است، در دمای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود. در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن متلاشی شده و در دمای بالای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مواد معدنی خمیر به حالت شیشه‌ای تغییر فاز می‌دهند [۲۱]. سنگ‌دانه مصرفی نیز در رفتار بتن تحت حرارت تأثیر چشمگیری دارد. در سنگ‌دانه‌های سیلیسی، کوارتز در دمای ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد دچار تغییر شکل، انبساط حجمی و آسیب‌های متعدد می‌شود. در سنگ‌دانه‌های آهکی، CaCO_3 در دمای ۸۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به CaO تبدیل شده و با افزایش دما انبساط پیدا می‌کند. همچنین به علت تبدیل CaCO_3 به CO_2 و CaO ممکن است انقباض در بتن رخ دهد و با تغییرات حجمی باعث تخریب نمونه شود [۲۱].

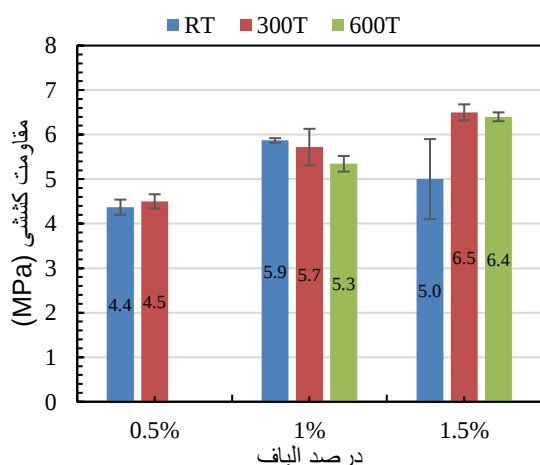
حالی که دماهای میانی (۲۰۰ الی ۳۰۰ درجه سلسیوس) می‌توانند به بهبود مقاومت کمک کنند، دماهای فوق‌العاده بالا (۵۰۰ درجه سلسیوس) به دلیل تخریب اجزای کلیدی ماتریس، تهدیدی جدی برای عملکرد سازه محسوب می‌شوند الیاف فلزی با ایجاد پل بین ترک‌ها، از گسترش ترک تحت نیروی کششی جلوگیری می‌کنند. این الیاف تنش را در سراسر ماتریس توزیع کرده و نیروی بیشتری برای گسیختگی ماده ایجاد می‌کند. افزایش درصد الیاف (بالای ۱ درصد) تراکم بیشتری از الیاف ایجاد می‌کند که به‌طور مؤثرتری ترک‌ها را مهار کرده و مقاومت کششی را افزایش می‌دهد. با این حال، الیاف فلزی ممکن است توزیع یکنواخت ماتریس را مختل کنند. در درصد‌های بالا، الیاف می‌توانند به‌صورت خوشه‌های تجمع یافته و نقاط ضعف یا تخلخل ایجاد کنند که تحت فشار متمرکز می‌شوند. افزودن الیاف زیاد ممکن است کارایی مخلوط را کاهش دهد و منجر به هوازگی یا جداسازی شود. همچنین تحت فشار، ماتریس بار اصلی را تحمل می‌کند.



شکل ۳- نمودار نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در درصدهای مختلف

الیاف فلزی با توزیع تصادفی ممکن است در جهت‌های نامناسب قرار گیرند و تحت فشار خمش یا کمناش کنند، که به جای تقویت، نقاط ضعف ایجاد می‌کند. همچنین طبق مشاهدات، نمونه‌های ساخته شده از بتن سبک با سبک‌دانه لیکا، بدون الیاف و در درصد‌های پایین

مقاومت کششی این نمونه‌ها به ۶/۳۹ مگاپاسکال رسید که افزایش ۲۷/۸ درصدی نسبت به دمای محیط را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، افزایش درصد حجمی الیاف فولادی منجر به بهبود مقاومت کششی بتن سبک می‌شود. این بهبود به دلیل توزیع مؤثر تنش‌ها توسط الیاف و جلوگیری از گسترش ترک‌ها در ماتریس بتن است. در نمونه‌های با ۰/۵٪ الیاف، افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس بهبود اندکی در مقاومت کششی ایجاد کرد که احتمالاً ناشی از تأثیر مثبت دما بر چسبندگی الیاف-ماتریس و بهینه‌سازی ساختار بتن است. در نمونه‌های با ۱٪ الیاف، کاهش مقاومت کششی در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان‌دهنده آسیب به ساختار بتن و کاهش چسبندگی بین الیاف و ماتریس است. در مقابل، نمونه‌های با ۱/۵٪ الیاف افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان دادند. این پدیده می‌تواند به دلیل افزایش اتصالات مؤثر بین الیاف و ماتریس در دماهای بالا و بهبود رفتار کششی بتن در حضور تراکم بالای الیاف باشد. به‌طور کلی، افزایش درصد الیاف و تغییرات دما اثرات متفاوتی بر مقاومت کششی دارند. درصد بالاتر الیاف به دلیل افزایش ظرفیت تحمل تنش و کاهش احتمال شکست در نقاط ضعف بتن، مقاومت کششی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۴- نمودار نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتنی در درصدهای مختلف

مطابق استاندارد Eurocode 2، مقاومت فشاری باقی‌مانده بتن معمولی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به حدود ۴۵٪ مقدار اولیه در دمای محیط کاهش می‌یابد. با این حال، داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق نشان داد که نمونه‌های بتن سبک حاوی ۱٪ الیاف فولادی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، تنها حدود ۸۵٪ افت مقاومت فشاری نسبت به دمای محیط تجربه کرده‌اند.

این عملکرد مطلوب نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی می‌تواند به طور مؤثری افت مقاومت ناشی از حرارت را کاهش دهد و عملکرد سازه‌ای بتن سبک را در شرایط آتش‌سوزی بهبود بخشد. بنابراین، بتن سبک الیافی نه تنها در شرایط دمای محیط عملکرد قابل قبولی دارد، بلکه در دماهای بالا نیز رفتاری فراتر از الزامات حداقلی کدهای طراحی بین‌المللی از خود نشان می‌دهد.

۳-۲- مقاومت کشش غیرمستقیم

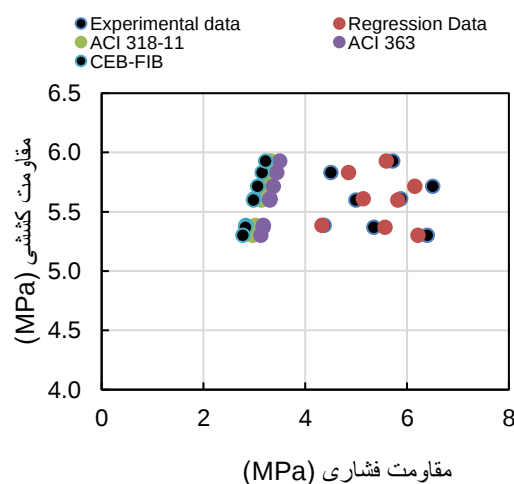
نتایج آزمون مقاومت کششی انجام‌شده بر روی نمونه‌های ۹۰ روزه مطابق با استاندارد ASTM C496 در شکل ۴ ارائه شده است. نمونه‌ها در سه دمای محیط، ۳۰۰ درجه و ۶۰۰ درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفتند. برای نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ حجمی الیاف، مقاومت کششی در دمای محیط ۴/۳۷ مگاپاسکال و در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۴/۵ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده افزایش ۲/۹۷ درصدی نسبت به دمای محیط است. در مقابل، برای نمونه‌های حاوی ۱٪ حجمی الیاف، مقاومت کششی در دمای محیط ۵/۸۷ مگاپاسکال و در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۵/۷۲ مگاپاسکال کاهش یافت که معادل افت ۲/۵۶ درصدی است. در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت کششی این نمونه‌ها به ۵/۳۴ مگاپاسکال رسید که کاهش ۹ درصدی نسبت به دمای محیط را نشان می‌دهد. برای نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ حجمی الیاف، مقاومت کششی در دمای محیط ۵ مگاپاسکال و در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۶/۵ مگاپاسکال افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد ۳۰ درصدی است. در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس،

میانگین مدول الاستیسیته برای نمونه‌های حاوی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فولادی به ترتیب ۳۲۳۳۹ مگاپاسکال، ۳۶۵۷۷ مگاپاسکال و ۱۸۲۱۸ مگاپاسکال است. با افزایش درصد حجمی الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪، مدول الاستیسیته افزایش یافته است که نشان‌دهنده بهبود در خاصیت ارتجاعی بتن است. این افزایش می‌تواند به دلیل توزیع مناسب الیاف در ماتریس بتن و افزایش توانایی جذب و توزیع نیروهای وارده باشد. با این حال، با افزایش درصد حجمی الیاف به ۱/۵٪، مدول الاستیسیته کاهش یافته است. این کاهش احتمالاً ناشی از تجمع الیاف و عدم توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس است که منجر به ایجاد نقاط ضعف در ساختار بتن می‌شود. شکل ۶ نمودار تنش-کرنش بتن سبک الیافی با ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فولادی در دمای محیط را نمایش می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف دارای کرنش حداکثر بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند که نشان می‌دهد الیاف به خوبی توانسته‌اند تغییر شکل‌ها را تحمل کنند. نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف نیز رفتار مشابهی با نمونه‌های ۱/۵٪ دارند، با این تفاوت که تنش حداکثر آن‌ها بالاتر است. این موضوع نشان‌دهنده افزایش مقاومت بتن به دلیل استفاده از الیاف بیشتر است. همچنین، کاهش تنش پس از رسیدن به تنش حداکثر با سرعت کمتری صورت می‌گیرد که بیانگر افزایش توانایی بتن در برابر شکست به واسطه حضور الیاف است. در نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف، تنش حداکثر نسبت به نمونه‌های ۱٪ کمتر است و پس از رسیدن به تنش حداکثر، کاهش تنش با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد الیاف ممکن است منجر به عدم توزیع مناسب آن‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت بتن شود. با مقایسه نتایج مدول الاستیسیته و نمودار تنش-کرنش با مقاومت فشاری، مشاهده می‌شود که افزایش درصد الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪ منجر به افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته می‌شود. این بهبود به دلیل بهینه‌سازی خواص مکانیکی بتن و توزیع مؤثر نیروها توسط

نتایج این مطالعه با نتایج محاسبه‌شده از معادلات پیشنهادی توسط ACI 318-11، ACI 363R-10، و Eurocode CEB-FIB در شکل ۵ مقایسه شد. بر اساس مشاهدات، با افزودن الیاف به ماتریس بتن، تفاوت بین نتایج ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌ها و نتایج آزمایشگاهی افزایش می‌یابد و دقت کافی ندارند. به همین دلیل، معادله ۱ بر اساس نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد شده است و طبق مشاهدات، با افزودن الیاف و اعمال حرارت، دقت کافی را دارد.

$$f_t = 0.562\sqrt{f_c} + 1.3782V_f + 0.00098T + 0.589 \quad (1)$$

در رابطه ۱، f_t برابر با مقاومت کششی (واحد اندازه‌گیری با f_c (MPa)، برابر با مقاومت فشاری (واحد اندازه‌گیری با V_f (MPa)، درصد حجمی الیاف و T دمای به درجه سلسیوس است و ضریب $R^2 = 0.65$ است. با توجه به در نظر گرفتن درصد الیاف و حرارت در این معادله، تلاش شده رابطه استخراج شده دارای ضریب R^2 مناسبی باشد نیاز به توجه است که ضریب R^2 با توجه به سه‌متغیره بودن پارامتر قابل توجیه است.



شکل ۵- نمودار رابطه بین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های مورد بررسی

۳-۳- مدول الاستیسیته

جدول ۲ نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های ۹۰ روزه مورد بررسی در دمای محیط را نشان می‌دهد. مقدار

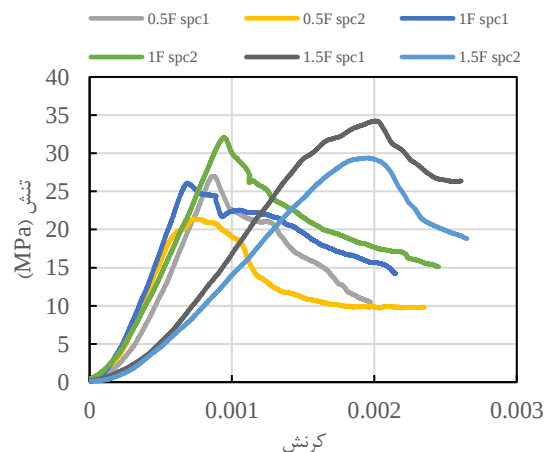
نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی بتن به‌واسطه حضور الیاف بیشتر و مقاومت بهتر در برابر دما است. نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف نیز مدول الاستیسیته‌ای معادل ۲۹۹۹۳ مگاپاسکال دارند که تقریباً مشابه نمونه‌های ۱٪ الیاف است. با این حال، به دلیل تجمع الیاف و کاهش توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس بتن، افزایش بیشتری در مدول الاستیسیته مشاهده نمی‌شود. شکل ۷ نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس را نمایش می‌دهد. در این نمودار، نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف کمترین تنش حداکثر را تجربه می‌کنند و پس از رسیدن به این نقطه، به سرعت دچار کاهش تنش می‌شوند. این رفتار نشان‌دهنده کاهش مقاومت و توانایی تحمل بار در نمونه‌های با درصد کم الیاف در دماهای بالا است. در نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف، تنش حداکثر بالاتر است و نمودار تنش-کرنش بیانگر توانایی بهتر این نمونه‌ها در تحمل بار و تغییر شکل است. این نمونه‌ها پس از رسیدن به تنش حداکثر، کاهش تنش کندتری را تجربه می‌کنند که نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش الیاف تا ۱٪ بر رفتار بتن در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس است. نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف نیز تنش حداکثر مشابهی با نمونه‌های ۱٪ دارند، اما پس از رسیدن به این نقطه، کاهش تنش با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. این موضوع بیانگر آن است که تجمع الیاف و عدم توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس بتن، منجر به کاهش توانایی نمونه‌ها در حفظ تنش در برابر تغییر شکل‌ها می‌شود. با مقایسه این نتایج با داده‌های مقاومت فشاری، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس منجر به کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن می‌شود. با این حال، استفاده از الیاف فولادی می‌تواند تا حدی تأثیرات منفی دما را کاهش داده و مقاومت و رفتار مکانیکی بتن را بهبود بخشد. در نهایت، بهترین عملکرد در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس مربوط به نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف است، درحالی‌که افزایش بیش از حد الیاف (به‌ویژه تا ۱/۵٪) می‌تواند به دلیل تجمع الیاف و کاهش یکنواختی توزیع آن‌ها، منجر به کاهش خواص مکانیکی بتن شود.

الیاف است. با این حال، افزایش بیشتر الیاف به ۱/۵٪ باعث کاهش همزمان مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری می‌شود. این کاهش ناشی از تشکیل نواحی ضعیف در بتن به دلیل تجمع الیاف و کاهش چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی است.

جدول ۲- نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد بررسی

در دمای محیط

نمونه	مدول الاستیسیته (MPa)	مقدار میانگین (MPa)
SFRC-0.5	۳۱۳۲۹	۳۲۳۳۹
	۳۳۴۶۹	
SFRC-1	۳۸۷۹۶	۳۶۵۷۷
	۳۴۳۵۸	
SFRC-1.5	۱۹۶۶۱	۱۸۲۱۸
	۱۶۷۷۴	



شکل ۶- نمودار تنش-کرنش بتن سبک الیافی

جدول ۳ نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد بررسی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. مشاهدات حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف کمترین مدول الاستیسیته را دارند. مقدار میانگین مدول الاستیسیته برای این نمونه‌ها ۱۱۸۳۸ مگاپاسکال است که در مقایسه با نمونه‌های آزمایش‌شده در دمای محیط، کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. این کاهش بیانگر تأثیر منفی قابل‌توجه دما بر مدول الاستیسیته بتن است. در مقابل، نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف دارای مدول الاستیسیته ۲۹۷۸۹ مگاپاسکال هستند که به‌وضوح بالاتر از نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف است. این افزایش

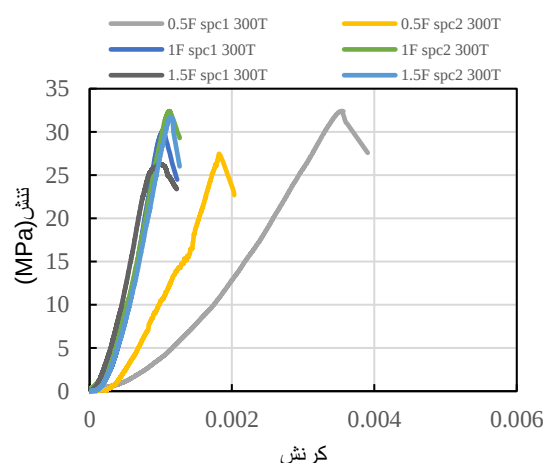
است. به‌طورکلی، افزایش دما از ۳۰۰ به ۶۰۰ درجه سلسیوس منجر به کاهش شدید مدول الاستیسیته و افت بیشتر مقاومت فشاری شد. برای نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. در دمای محیط، مدول الاستیسیته این نمونه‌ها حدود ۱۹۴۶۱ مگاپاسکال و مقاومت فشاری میانگین ۳۱/۳۵ مگاپاسکال بود. در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، مدول الاستیسیته به ۳۰۵۹۵ مگاپاسکال افزایش یافت و مقاومت فشاری میانگین به ۳۲/۶۵ مگاپاسکال رسید. باین‌حال، در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مدول الاستیسیته به ۱۳۵۱۸ مگاپاسکال و مقاومت فشاری به ۲۸/۱ مگاپاسکال کاهش یافت. نمودارهای تنش-کرنش نیز تأثیرات افزایش دما را به‌وضوح نشان می‌دهند. در دمای محیط، نمونه‌های حاوی ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فولادی حداکثر نیرو و کرنش بهتری را تجربه کردند. با افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس، اگرچه مقدار حداکثر نیرو کاهش یافت، اما تغییرات چندان شدید نبود. در مقابل، در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، حداکثر نیرو و کرنش به طور قابل‌توجهی کاهش یافت و منحنی‌ها نشان‌دهنده کاهش ظرفیت تحمل نیرو و تغییر شکل بودند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به کاهش ملایم در خواص مکانیکی بتن منجر می‌شود، درحالی‌که دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس تأثیرات بسیار شدیدی دارد که شامل کاهش قابل‌توجه مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری و ظرفیت تغییر شکل است. استفاده از الیاف فولادی در دماهای پایین‌تر می‌تواند به بهبود عملکرد بتن کمک کند، اما در دماهای بالاتر، کارایی الیاف کاهش‌یافته و نمی‌تواند به طور مؤثری مانع از افت شدید خواص مکانیکی بتن شود [۲۳-۲۷].

شکل ۸ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مورد بررسی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. در این دما، تمامی نمونه‌ها کاهش چشمگیری در مقاومت و شکل‌پذیری از خود نشان دادند. نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف فولادی همچنان بالاترین مقاومت را حفظ کردند، اما

جدول ۳- نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد

بررسی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس

نمونه	مدول الاستیسیته (MPa)	مقدار میانگین (MPa)
SFRC-0.5	۹۲۴۵	۱۱۸۳۸
	۱۴۴۳۲	
SFRC-1	۲۹۸۸۷	۲۹۷۸۹
	۲۹۶۹۲	
SFRC-1.5	۳۰۱۹۵	۲۹۹۹۳
	۲۹۷۹۲	



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس

جدول ۴ نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد

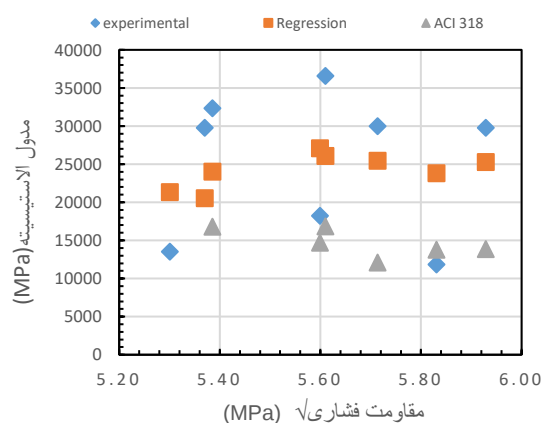
بررسی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. در دمای محیط، نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته میانگین ۳۳۳۶۹ مگاپاسکال و مقاومت فشاری میانگین ۳۱/۴۷ مگاپاسکال بودند. با افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس، مدول الاستیسیته به ۲۹۷۸۹ مگاپاسکال کاهش یافت، درحالی‌که مقاومت فشاری میانگین به ۳۵/۱۵ مگاپاسکال افزایش پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس اگرچه باعث کاهش مدول الاستیسیته شد، اما این کاهش در این مرحله چندان شدید نبود. با افزایش دما به ۶۰۰ درجه سلسیوس، مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف به ۱۲۱۹۴ مگاپاسکال و مقاومت فشاری به ۲۸/۸۴ مگاپاسکال کاهش یافت. این کاهش قابل‌توجه بیانگر تأثیرات منفی شدید دمای بالا بر سختی و مقاومت بتن

سلسیوس)، نیاز به بهینه‌سازی ترکیبات بتن و استفاده از الیاف مقاوم در برابر حرارت وجود دارد.

شکل ۹ نمای رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی و مدول الاستیسیته را نمایش می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده رابطه ۲ برای برقراری ارتباط بین این دو متغیر گزارش شد. برای بررسی رابطه حاصله با رابطه موجود، رابطه با رابطه موجود در ACI 318 برای بتن‌های سبک مورد بررسی قرار گرفت.

$$E = 4303\sqrt{f_c} + 2128V_f - 7.79T \quad (2)$$

در رابطه ۲، E برابر با مدول الاستیسیته (واحد اندازه‌گیری با MPa)، f_c برابر با مقاومت فشاری (واحد اندازه‌گیری با MPa)، V_f درصد حجمی الیاف و T نمایانگر دما به درجه سلسیوس است و ضریب $R^2 = 0.88$ است. با توجه به در نظر گرفتن درصد الیاف و حرارت در این معادله، تلاش شده رابطه استخراج شده دارای ضریب R^2 مناسبی باشد. نمودار نشان‌دهنده در نظر گرفتن تأثیرات حرارت و الیاف بر روابط موجود در زمینه ارتباط بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری است. این تفاوت نتایج بررسی شده با روابط آئین‌نامه، می‌تواند تحقیقات بیشتر در زمینه بتن‌های سبک الیافی در برابر حرارت و را برجسته‌تر کند.



شکل ۹- نمای رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی و مدول الاستیسیته

۴-۳- آزمون سرعت امواج التراسونیک

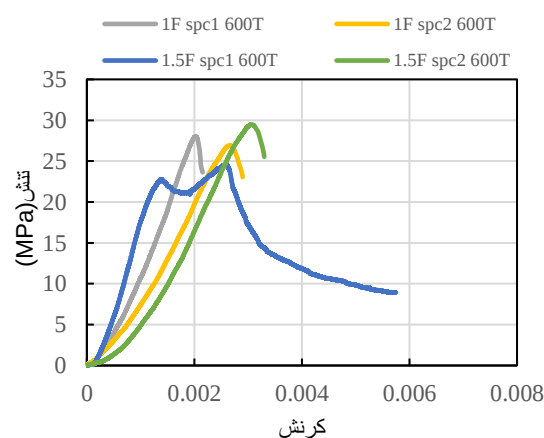
میزان افت مقاومت آن‌ها در مقایسه با دماهای ۳۰۰ درجه سلسیوس و دمای محیط به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

جدول ۴- نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد بررسی در

دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

نمونه	مدول الاستیسیته (MPa)	مقدار میانگین (MPa)
SFRC-1	۱۴۰۲۶	۱۲۱۹۴
	۱۰۳۶۲	
SFRC-1.5	۱۷۲۴۴	۱۳۵۱۸
	۹۷۹۳	

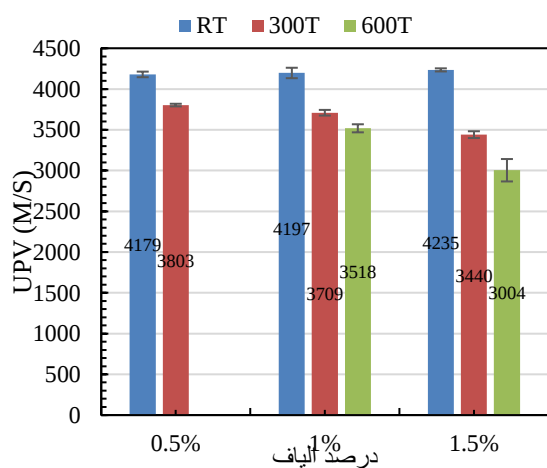
این پدیده به دلیل تأثیرات مخرب حرارت بالا بر ماتریس سیمانی و خواص مکانیکی بتن است. نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی مقاومت بسیار کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان دادند و پس از رسیدن به پیک تنش، افت شدیدتری را تجربه کردند. این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف، کاهش مقاومت سریع‌تر و قابل توجه‌تری داشتند.



شکل ۸- نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

به‌طورکلی، حضور الیاف فولادی، به‌ویژه در درصدهای بالاتر، توانسته است تا حدی از گسترش ترک‌های بزرگ جلوگیری کند و مقاومت بتن را در برابر شکست بهبود بخشد. با این حال، عملکرد الیاف در دماهای پایین‌تر (مانند ۳۰۰ درجه سلسیوس و دمای محیط) به‌مراتب بهتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که برای بهبود عملکرد بتن در دماهای بسیار بالا (مانند ۶۰۰ درجه

الیاف فلزی نیز تحت تأثیر قرار گرفته و ممکن است کارایی خود را از دست بدهند. کاهش شدید سرعت امواج اولتراسونیک با افزایش درصد الیاف در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس بیانگر این است که بتن‌های حاوی درصد بالاتر الیاف، به دلیل تغییرات ساختاری بیشتر، مقاومت کمتری در برابر حرارت نشان می‌دهند. نتایج کلی نشان می‌دهد که در دمای محیط، الیاف فلزی باعث افزایش سرعت پالس‌های اولتراسونیک و بهبود کیفیت بتن می‌شوند. با این حال، با افزایش دما به ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، کاهش چشمگیری در UPV مشاهده می‌شود که به تخریب ساختار بتن و ضعف پیوند بین الیاف و ماتریس سیمانی مربوط می‌شود. همچنین، با افزایش درصد الیاف، افت بیشتری در سرعت پالس‌ها دیده می‌شود که بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر بتن‌های با درصد بالاتر الیاف در دماهای بالا است. این نتایج تأیید می‌کند که در دماهای بالا، کارایی الیاف فلزی در تقویت بتن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- نتایج آزمون امواج اولتراسونیک

شکل ۱۱، همبستگی بین سرعت موج اولتراسونیک و مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهند. درک این روابط به پیش‌بینی مقاومت نمونه‌های بتن سبک حاوی الیاف فلزی که تحت تأثیر حرارت قرار گرفته‌اند، کمک می‌کند. معادله ۳ همبستگی بین مقاومت

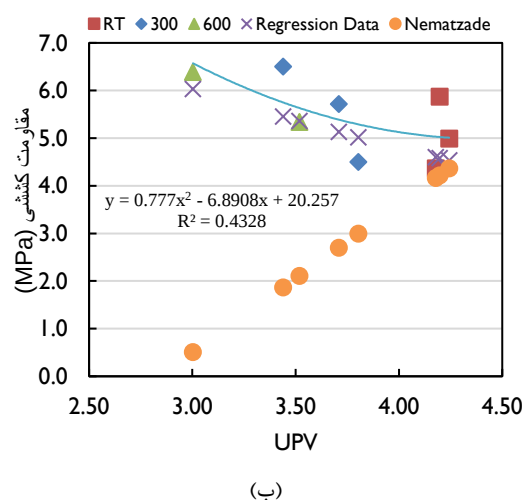
شکل ۱۰ نتایج آزمون امواج اولتراسونیک^۱ (UPV) بر روی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد. سرعت انتقال امواج بر اساس رابطه استاندارد ASTM C597 محاسبه و تأثیر دما و درصد الیاف فلزی بر خواص بتن تحلیل شد. آزمون‌ها در سه دمای محیط، ۳۰۰ درجه سلسیوس و ۶۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. در دمای محیط، سرعت امواج اولتراسونیک برای نمونه‌های حاوی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فلزی به ترتیب ۴۱۷۹، ۴۱۹۷ و ۴۲۴۳ متر بر ثانیه ثبت شد. این مقادیر نشان‌دهنده کیفیت بالا و تراکم مناسب بتن در شرایط عادی هستند. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فلزی، سرعت پالس اندکی افزایش می‌یابد که بیانگر بهبود پیوستگی و همگنی ساختار بتن است. حضور الیاف فلزی در دمای محیط نقش تقویت‌کننده دارد و با جلوگیری از ایجاد ترک‌های ریز در ماتریس سیمانی، مقاومت کششی بتن را بهبود می‌بخشد. با افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس، سرعت پالس‌های اولتراسونیک کاهش یافت. برای نمونه‌های حاوی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فلزی، سرعت امواج اولتراسونیک به ترتیب به ۳۸۰۳، ۳۷۰۹ و ۳۴۴۰ متر بر ثانیه کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده تأثیر منفی حرارت بر ساختار بتن است. در این دما، تبخیر آب درونی بتن و ایجاد ترک‌های ریز می‌تواند دلیل اصلی کاهش سرعت پالس باشد. کاهش سرعت امواج اولتراسونیک در نمونه‌های با درصد بیشتر الیاف بیانگر این است که افزایش دما اثرات تخریبی بیشتری بر بتن الیافی دارد و باعث ضعف در پیوند بین الیاف و ماتریس سیمانی می‌شود. در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، کاهش بیشتری در سرعت پالس‌های اولتراسونیک مشاهده شد. برای نمونه‌های حاوی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فلزی، سرعت امواج اولتراسونیک به ترتیب به ۳۵۱۸، ۳۴۴۰ و ۳۰۰۳ متر بر ثانیه کاهش یافت. این کاهش شدید نشان‌دهنده آسیب جدی به ساختار بتن در اثر دمای بالا است. در این شرایط،

¹ Ultra-sonic pulse velocity

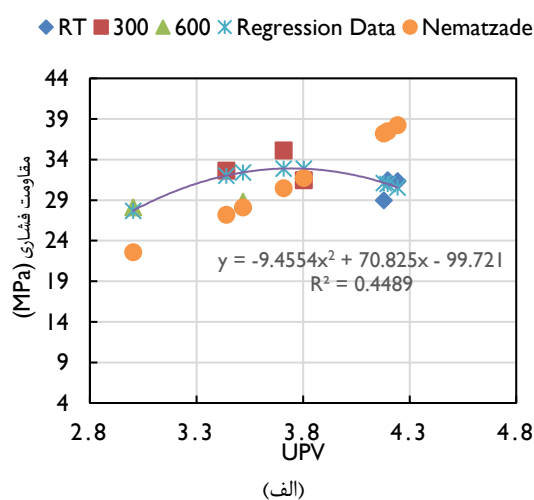
بدست آوردن رابطه‌ای با دقت بالا نیازمندهای پژوهش‌های متعدد در این زمینه است که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار بگیرد.

$$f_c = -9.45UPV^2 + 70.8UPV - 99.7 \quad (3)$$

$$f_t = 0.77UPV^2 - 6.89UPV + 20.25 \quad (4)$$



فشاری و نتایج آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک را ارائه می‌دهد، درحالی‌که معادله ۴ رابطه بین مقاومت کششی (برحسب مگاپاسکال) و نتایج آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک (بر حسب کیلومتر بر ثانیه) را بیان می‌کند. برای افزایش اعتبار معادلات ارائه‌شده، مقایسه‌هایی با معادلات موجود در ادبیات، از جمله معادلات پیشنهادشده توسط نعمت‌زاده، انجام شد. با توجه به متغیرهای متفاوت بررسی شده در این پژوهش، مشاهدات نشان دادند که



شکل ۱۱- همبستگی بین سرعت موج اولتراسونیک و (الف) مقاومت فشاری و (ب) مقاومت کششی

می‌کنند؛ هرچند ممکن است نقاط تماس الیاف با ماتریس، نواحی تضعیف‌شده‌ای را ایجاد کنند. قرارگیری نمونه‌ها در معرض دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس موجب تخریب قابل توجهی در ماتریس و احتمالاً نواحی پیرامون الیاف شده است. دمای بالا معمولاً با تبخیر رطوبت داخلی بتن همراه است که نتیجه آن تشکیل منافذ و ترک‌های ریز و تضعیف پیوند بین الیاف و ماتریس سیمانی است. افزودن ۱/۵ درصد الیاف فولادی اگرچه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را بهبود می‌بخشد، اما تخریب ماتریس در این دما ممکن است کارایی الیاف را کاهش دهد. تغییرات ایجادشده در بافت ماتریس نیز می‌تواند بر یکپارچگی سازه پس از گرمایش تأثیر منفی بگذارد. در ۶۰۰ درجه سلسیوس، آسیب‌های وارده به سطح الیاف فولادی و ماتریس بتن تشدید می‌شود که احتمالاً ناشی از تنش‌های حرارتی شدید است. در این دما، کاهش چسبندگی بین الیاف و ماتریس، همراه با ایجاد

۳-۵- عکس‌برداری SEM

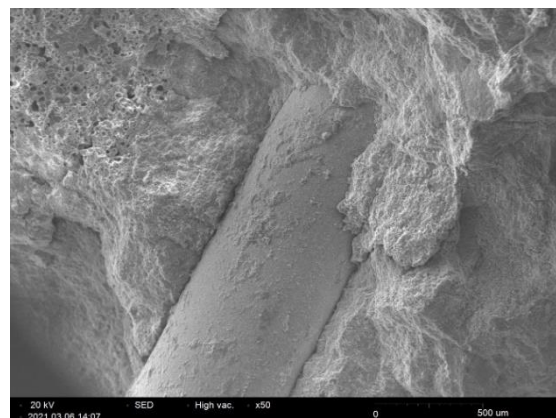
شکل ۱۲ ریزساختار بتن‌های سبک حاوی درصد‌های مختلف الیاف فولادی را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مشاهدات حاکی از آن است که الیاف به‌خوبی در ماتریس بتن جاسازی شده‌اند؛ باین‌حال، در نواحی مجاور الیاف، ترک‌ها و شکستگی‌های ریزی در ماتریس بتن مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از اختلاف استحکام در ناحیه مرزی بین الیاف و بتن است. در بزرگ‌نمایی‌های بالاتر، سطح تماس الیاف فولادی و بتن از بافت پیچیده‌تری برخوردار است و شکستگی‌های بیشتری به‌ویژه در حوالی الیاف دیده می‌شود. این پدیده می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل ترک‌های میکروسکوپی ناشی از انقباض و تنش‌های مکانیکی باشد. تصاویر همچنین تأثیر الیاف فولادی را به‌عنوان تقویت‌کننده در افزایش استحکام بتن تأیید

گسترده‌تر ماتریس (حالت خردشدگی) و تشکیل حفره‌ها و ترک‌های میکروسکوپی بیشتر است.

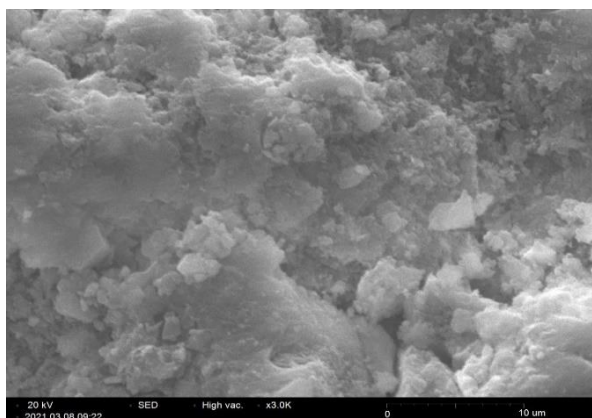
تنش‌های انبساطی، به شکست و تخریب مرزهای مشترک منجر می‌شود. مقایسه نمونه‌های حرارت دیده در ۶۰۰ درجه با نمونه‌های ۳۰۰ درجه، نشان‌دهنده تخریب



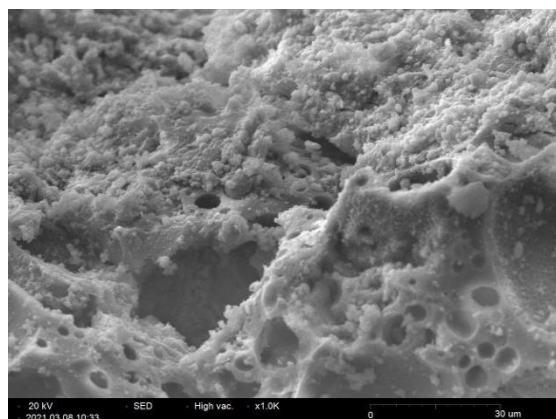
نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۱٪ الیاف فولادی



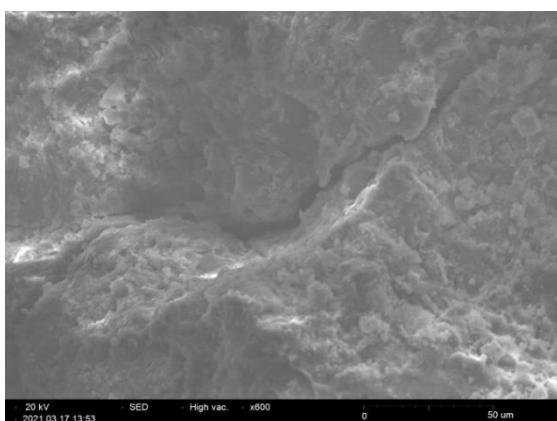
نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۰.۵٪ الیاف فولادی



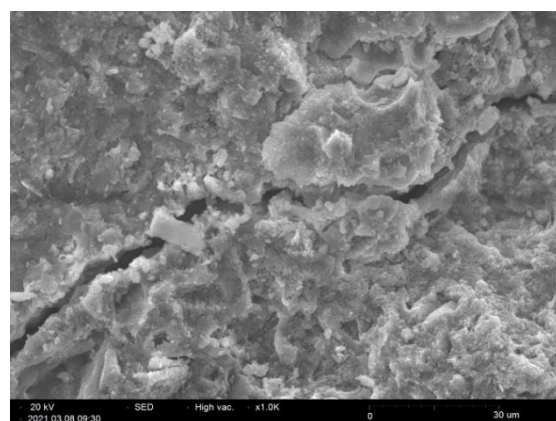
نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۰.۵٪ الیاف فولادی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس



نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۰.۵٪ الیاف فولادی

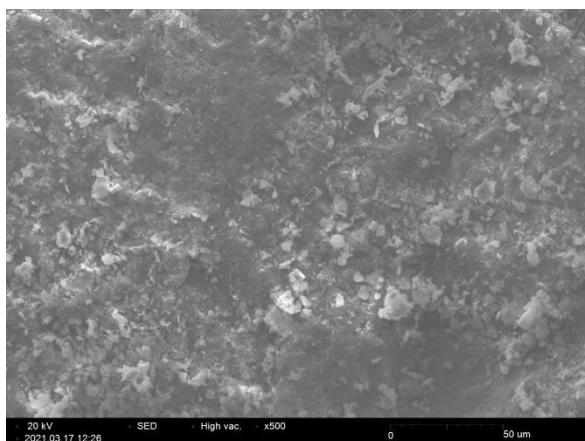


نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۱٪ الیاف فولادی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس



نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۰.۵٪ الیاف فولادی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

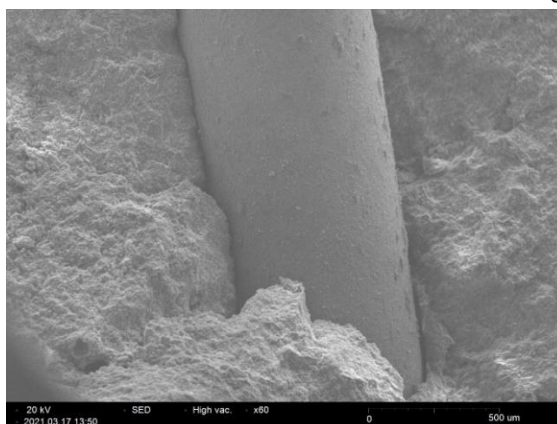
شکل ۱۲- نمای ریزساختار بتن در دماهای مختلف



نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۱/۵٪ الیاف فولادی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس



نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۱٪ الیاف فولادی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس



نمای ریزساختار نمونه‌های بتن سبک حاوی ۱/۵٪ الیاف فولادی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس
شکل ۱۲- ادامه

در این پژوهش، تأثیرات حرارت بر مشخصات مکانیکی بتن‌های سبک حاوی الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های بتن سبک با سه درصد حجمی الیاف (۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪) در دماهای محیط، ۳۰۰ و ۶۰۰ آزمایش شدند. با ارزیابی خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته، نتایج زیر به دست آمد:

۱. افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس به دلیل تبخیر آب آزاد و تراکم بهتر ماتریس سیمانی، بهبود نسبی در مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها ایجاد کرد. با این حال، با رسیدن دما به ۶۰۰ درجه سلسیوس، افت محسوسی در مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و ظرفیت کرنش مشاهده شد که علت

این مشاهدات گویای تأثیر چشمگیر دمای بالا بر ساختار بتن و عملکرد الیاف فولادی است. به‌طور کلی، تأثیر دماهای بالا بر بتن سبک را می‌توان به عواملی همچون توقف هیدراتاسیون خمیر سیمان، افزایش تخلخل، کاهش رطوبت، انبساط حرارتی، تغییر فشار منافذ، کاهش مقاومت و ایجاد ترک‌های ناشی از ناهمگونی دمایی نسبت داد. این عوامل به طور هم‌زمان موجب تضعیف ساختار بتن و تغییرات محسوس در ریزساختار آن می‌شوند که در تصاویر میکروسکوپی بتن‌های معمولی تحت حرارت‌های بالا نیز به‌وضوح قابل‌ردیابی است [۲۸].

۴- بحث بر روی نتایج

۴-۱ بررسی نتایج

اصلی آن تخریب ژل C-S-H و کاهش چسبندگی بین الیاف و ماتریس بود.

۲. افزایش درصد الیاف فولادی تا ۱٪ موجب بهبود قابل توجه مقاومت و سختی بتن در دماهای پایین و عملکرد مکانیکی مطلوب‌تر در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس شد. با این حال، افزایش مقدار الیاف به ۱/۵٪ اثر معکوس داشت: تجمع و توزیع نامناسب الیاف، نقاط ضعف ساختاری ایجاد کرد. این تجمع خوشه‌ای در درصدهای بالا باعث تشکیل تخلخل، کاهش یکنواختی ماتریس، تمرکز تنش، کاهش کارایی مخلوط، هوازدهی و جداشدگی می‌گردد.

۳. در دماهای بالاتر (مانند ۶۰۰ درجه سلسیوس)، همه نمونه‌ها کاهش در خواص مکانیکی تجربه کردند. با این حال، نمونه‌های حاوی درصد بالاتر الیاف، به دلیل توزیع مناسب تنش و کاهش ترک‌ها، همچنان عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های با درصد کمتر الیاف داشتند.

۴. نتایج آزمون امواج اولتراسونیک نشان داد که سرعت پالس‌های اولتراسونیک در بتن‌های سبک حاوی الیاف فلزی، همبستگی مستقیمی با مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها دارد. در دمای محیط، افزایش درصد الیاف فلزی موجب افزایش سرعت پالس و بهبود کیفیت بتن شد. اما با افزایش دما به

۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، کاهش محسوس سرعت پالس مشاهده گردید که نشان‌دهنده‌ی تخریب ساختار داخلی بتن و تضعیف پیوند بین الیاف و ماتریس سیمانی است.

۲-۴- پیشنهادات بررسی‌های آینده

در این مطالعه، برای بررسی تأثیر تنها متغیر درصد حجمی، از الیاف فولادی دوسرقلاب با نسبت طول به قطر ثابت ($L/D = 60$) استفاده شد. با این حال، در پژوهش‌های آینده پیشنهاد به انجام آزمون‌های فشاری، کششی و ضربه‌ای برای هر ترکیب و تحلیل نتایج با روش ANOVA، امکان شناسایی سطوح بهینه و بررسی نظام‌مند تأثیر نسبت ابعادی بر خواص مکانیکی بتن الیافی و مدلسازی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود ABAQUS، ANSYS و بهینه‌سازی پارامترهای مخلوط برای بهبود کارایی حرارتی-مکانیکی می‌شود. همچنین استفاده از ترکیبات حاوی پوزولان بادی و الیاف جهت کاهش ردپای کربنی بتن سبک نیز قابل بررسی است.

قدردانی

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبارات ویژه پژوهشی (Grant) دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره طرح ۱۱۴۳/م/پ انجام شده است.

References

- [1] Bremner TW. *Lightweight Concrete* [dissertation]. Fredericton, NB: University of New Brunswick; 1980.
- [2] Newman J, Owens P. *Properties of Lightweight Concrete*. 1st ed. London: Longman; 1977.
- [3] British Standards Institution. *BS 1881: Part 113: Method for Making and Curing No-Fines Test Cubes*. London: BSI; 1983.
- [4] Norwegian Council for Building Standardisation. *NS 3473: Concrete Structures*. Oslo: NCBS; 1989.
- [5] American Concrete Institute. *ACI 318-89: Building Code Requirements for Structural Concrete*. Detroit, MI: ACI; 1989.
- [6] Bremner TW, Newman JB. Microstructure of low-density concrete aggregate. In: *Proceedings of the 9th Congress of the International Federation for Prestressing (FIP)*. Vol. 3. Stockholm: FIP; 1992.
- [7] Newman JB. Properties of structural lightweight aggregate concrete. In: Clarke JL, editor. *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. 1st ed. London: Blackie Academic & Professional; 1993. p. 19–44.
- [8] Dolby PG. Production and properties of Lytag™ aggregate. In: Holand I, editor. *Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway: Norwegian Concrete Association; 1995. p. 326–336.

- [9] Abbass W, Khan MI, Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater.* 2018;168:556–569. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.135
- [10] Altun F, Aktas B. Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete. *Constr Build Mater.* 2013;38:575–581. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.045
- [11] Caratelli A, Meda A, Rinaldi Z. Monotonic and cyclic behaviour of lightweight concrete beams. *Constr Build Mater.* 2016;122:23–35. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.042
- [12] Du H, Du S, Liu X. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. *Constr Build Mater.* 2015;82:114–122. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.054
- [13] Kaveh A. The use of artificial neural networks to optimize compressive strength of concrete. In: *Intelligent Optimization in Sustainable Environments*. Cham: Springer; 2024. p. [Chapter 3]. doi:10.1007/978-3-031-66051-1_3
- [14] Hosseini P, Kaveh A, Naghian A, Abedi A. Eco-friendly building solutions: integrating Mahallat's travertine sludge. *Int J Optim Civil Eng.* 2024;14:229–252
- [15] Hosseini P, Kaveh A, Naghian A. Development and optimization of self-compacting concrete mixes. *Int J Optim Civil Eng.* 2023;13:457–476.
- [16] Hosseini P, Kaveh A, Naghian A, Abedi A. Optimization of artificial stone mix design using microsilica. *Int J Optim Civil Eng.* 2024;14:445–460. doi:10.22068/ijoc.2024.14.3.602
- [17] Wang XF, Huang YJ, Wu GY, Fang C, Li DW, Han NX, et al. Effect of nano-SiO₂ on lightweight aggregate concrete. *Constr Build Mater.* 2018;175:115–125. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.185
- [18] Hertz K. Concrete strength for fire safety design. *Mag Concr Res.* 2005; 57(8): 445–453. doi:10.1680/mac.2005.57.8.445
- [19] Janotka I, Nürnbergerová T. Effect of temperature on structural quality of cement paste. *Nucl Eng Des.* 2005; 235(17–18): 2019–2032. doi:10.1016/j.nucengdes.2005.05.011
- [20] Yüzer N, Aköz F, Öztürk L. Compressive strength–color change relation in mortars. *Cem Concr Res.* 2004; 34(10): 1803–1807. doi:10.1016/j.cemconres.2004.01.015
- [21] Malik M, Bhattacharyya SK, Barai SV. Thermal and mechanical properties of concrete at elevated temperatures. *Constr Build Mater.* 2021;270:121398. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121398
- [22] Mashshay AF, Hashemi SK, Tavakoli H. Post-fire mechanical degradation of lightweight concretes. *Sustainability.* 2023;15(9):7463. doi:10.3390/su15097463
- [23] Altalib F, Tavakoli H, Hashemi SK. Static and dynamic behavior of structural lightweight concrete. *Civil Infrastructure Researches.* 2024;10(1):85–107. doi:10.22091/cer.2023.9673.1497.
- [24] Saadatkhoosh M, Arezoumandi M, Pour Hosseini SH. Verification of mechanical properties provisions for lightweight concrete. *Civil Infrastructure Researches.* 2018;4(1):41–55. doi:10.22091/cer.2018.2951.1109
- [25] Shamsi AR, Mousavi SY, Tabarsa AR. Effects of NaOH concentration on self-compacted geopolymer concrete. *Civil Infrastructure Researches.* 2025. doi:10.22091/cer.2025.11254.1570
- [26] Arabyarmohammadi H, Sharbatdar MK, Naderpour H. Effect of non-steel fibers on RCCP. *Civil Infrastructure Researches.* 2023;9(2):17–33. doi:10.22091/cer.2023.8714.1435
- [27] Shahhoseini MR, Sharbatdar MK, Kheyroddin A. Strength and durability of concretes with heated zeolite. *Civil Infrastructure Researches.* 2024;10(2):35–50. doi:10.22091/cer.2024.10381.1540
- [28] Altalib F, Tavakoli HR, Hashemi SK. Post-fire behavior of lightweight structural concrete. *Int J Eng.* 2023;36(11):1942–1960. doi:10.5829/ije.2023.36.11b.01