

Investigation of the effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concretes containing different fibers

Mohammad Saber Moradi¹, Mohammad Hadi Tavana^{2*}, Mohammad Reza Habibi², Moslem Amiri²

1- Ph.D. candidate, dept. civil engineering, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

2- Assistant Professor, dept. civil engineering, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

This study investigates the impact of various fibers on the performance of concrete under high-temperature conditions, considering the prevalent factors leading to concrete degradation, such as loading, thermal fluctuations, and moisture changes. In seismic-prone regions like Iran, the post-earthquake scenario often involves fire hazards, making the study of fire-induced concrete deterioration particularly relevant. The research focuses on determining the optimal percentage of fibers to enhance concrete behavior under high temperatures. A comprehensive set of tests, including slump, 7-day and 28-day compressive strength, and tensile strength assessments, was conducted on both fresh and hardened concrete samples. The study systematically varied fiber percentages, types, sample ages, applied heat levels, and cement content in the mix design to evaluate their collective impact on fiber-reinforced concrete in high-temperature environments. Results revealed that the inclusion of fibers led to a decrease in the workability of the concrete mix. However, this was offset by a significant contribution to the preservation of both compressive and tensile strength. Notably, polypropylene fibers exhibited superior performance compared to steel fibers. In grades 350, 400, and 450, the compressive strength increased by 8%, 22%, and 8.5%, respectively, when using polypropylene fibers instead of steel fibers. Similarly, the improvement in tensile strength with polypropylene fibers surpassed that of steel fibers, with enhancements of 22%, 16%, and a substantial 110% for grades 350, 400, and 450. The findings underscore the effectiveness of incorporating fibers, particularly polypropylene, in mitigating the adverse effects of high temperatures on concrete, offering insights that can inform future construction practices, especially in seismic regions prone to fire hazards.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 February 2024

Revise Date: 22 May 2024

Accept Date: 29 June 2024

Keywords:

Compressive strength
Tensile strength

Cement content

Steel fiber

P.P. fiber

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.441324.3354](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.441324.3354)

*Corresponding author: Mohammad Hadi Tavana.

Email address: m.h.tavana@iauksh.ac.ir

بررسی تأثیر حرارت‌های بالا بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف مختلف

محمدصابر مرادی¹، محمدهادی توانا^{2*}، محمدرضا حبیبی²، مسلم امیری²

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

زوال بتن به تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته بوده و تغییرات دمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریزترک‌ها می‌شوند. با اعمال بار، ریزترک‌ها به هم متصل شده و ترک‌ها را تشکیل می‌دهند و در نهایت این ترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شوند. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها محسوب می‌شود. از طرفی آتش‌سوزی یکی از مواردی است که همواره سازه‌های مهندسی را تهدید می‌کند. با توجه به لرزه خیز بودن ایران، این تهدید جای تامل بیشتری دارد؛ زیرا همواره آتش‌سوزی یکی از خطرات بعد از زلزله است. دماهای بالا باعث تغییرات شیمیایی و فیزیکی آشکار می‌شود که این امر منجر به تخریب بتن می‌گردد. در این تحقیق سعی بر آن است که با استفاده از الیاف مختلف (فولادی و پلی‌پروپیلن)، میزان کاربرد متفاوت الیاف در بتن‌های با عیار مختلف، میزانی بهینه از کاربرد الیاف در بتن تحت حرارت‌های بالا ارائه گردد. آزمایش‌هایی مانند اسلامپ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی 7 و 28 روزه بر روی نمونه‌های بتن تازه و سخت‌شده صورت گرفت. با تغییر میزان الیاف، نوع الیاف، سن نمونه‌ها، میزان حرارت اعمالی و میزان سیمان موجود در طرح اختلاط سعی شد تأثیر این عوامل بر رفتار بتن الیافی تحت اثر آتش‌سوزی ارزیابی شود. نتایج نشان داد که افزودن الیاف موجب کاهش روانی مخلوط بتنی می‌شود. بعلاوه، کارایی اضافه کردن الیاف در ممانعت از کاهش مقاومت فشاری و کششی قابل توجه بود. همچنین، الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف فولادی عملکرد بهتری داشته و مقاومت فشاری برای عیارهای 350، 400 و 450 به ترتیب، 8، 22 و 8/5٪ نسبت به الیاف فولادی افزایش از خود نشان داد. بهبود عملکرد الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف فولادی برای مقاومت کششی به ترتیب 22، 16 و 110٪ بود.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عیار بتن، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.441324.3354	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.441324.3354	1403/12/30	1403/12/30	1403/04/09	1403/03/02	1402/11/23
محمدهادی توانا m.h.tavana@iauksh.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

1- مقدمه

بتن به عنوان یکی از ملزومات مورد نیاز جهت ساخت بسیاری از سازه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در حالت کلی، بتن جزء مصالح بادوام به شمار می‌رود که در صورت ساخت و اجرای مناسب می‌تواند در شرایط محیطی شدید عملکردی مناسب از خود نشان دهد. با این حال، به دلیل ماهیت ناهمگن بتن و پیچیدگی‌های ذاتی در آن، خرابی‌های زیادی در سازه‌های بتن مسلح به چشم می‌خورد. در سال‌های اخیر به کارگیری الیاف به عنوان یکی از راه کارهای مناسب و عملی در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن مورد توجه قرار گرفته است [1 و 2]. انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریزترک‌ها می‌شوند و چنین ریزترک‌هایی در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند [3]. با اعمال بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک‌ها به هم متصل شده و ترک‌ها را تشکیل می‌دهند و نهایتاً این ترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شوند. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها محسوب می‌شود [4]. بتن الیافی در حقیقت یک نوع ماده مرکب بوده و الیاف موجب افزایش مقاومت کششی، فشاری، سایشی، برشی، یکپارچگی، فرم پذیری، ضربه پذیری و قابلیت جذب انرژی خمشی و پایداری و دوام بتن در مقابل آتش، شوک حرارتی و انفجار می‌گردد [5]. نقش مثبت الیاف تا مرحله سخت‌شدگی بتن نیز ادامه داشته و باعث تقویت ریز ساختار و افزایش شکل پذیری مقطع می‌شود [6].

آتش سوزی یکی از خطراتی است که همواره ساختمان‌ها و سازه‌ها را تهدید می‌کند. بتن به علت طبیعت غیر قابل اشتعال خود امتیازی مثبت هنگام مواجهه با آتش دارد. با این حال، آتش موجب تغییراتی فیزیکی و شیمیایی در بتن می‌شود که در نهایت منجر به خرابی سازه می‌گردد. مهم‌ترین اثر آتش بر بتن شامل کم شدن آب خمیر سیمان، افزایش تخلخل، تغییر میزان رطوبت، تغییر فشار مرکزی، وقوع ترک‌های حرارتی به علت ناهمسازی ترکیبات بتن، خزش گرمایی می‌باشد [7]. یکی از راه‌های مؤثر در کاهش و یا از بین بردن این عوامل، استفاده از الیاف در بتن می‌باشد [8].

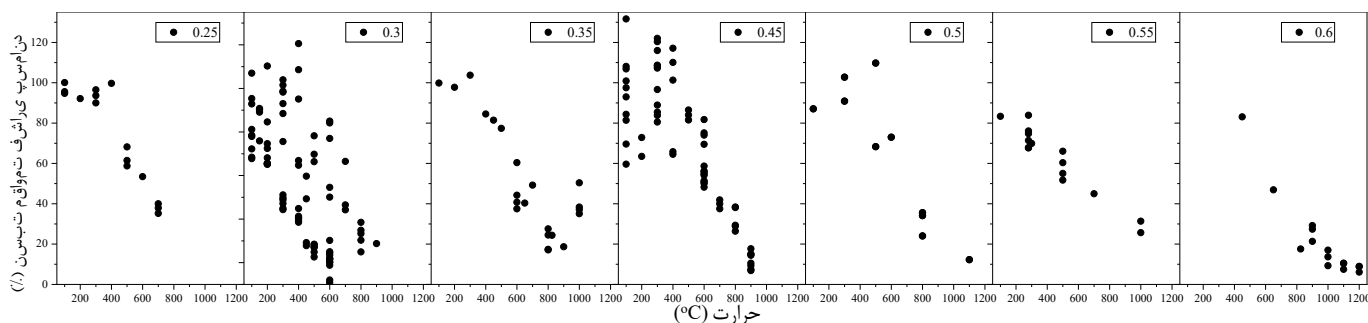
با بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه تأثیر حرارت‌های بالا بر بتن الیافی (جدول 1)، می‌توان گفت بخش عمده این تحقیقات در زمینه الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بوده است. دلیل این امر را می‌توان به وفور این الیاف در صنعت و همچنین عملکرد مثبت این الیاف نسبت داد. با بررسی تحقیقات، مشاهده می‌شود که افزایش حرارت موجب کاهش مقاومت فشاری بتن الیافی شده و این کاهش در نمونه‌های با نسبت کمتر آب به سیمان در حرارت‌های بیشتر از 400°C بیشتر است (شکل 1). بعلاوه، تعداد نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر که دچار کاهش مقاومت شده‌اند، کمتر است که نشان دهنده احتمال وقوع قله‌کن شدن به علت حرارت‌های بالا می‌باشد. با این حال نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر عملکرد بهتری در حرارت‌های کمتر از 400°C در مقایسه با نسبت‌های بالاتر آب به سیمان از خود نشان دادند. دلیل این امر را می‌توان به کمیّت و کیفیت مواد سیمانی و نوع سنگدانه‌های به کار گرفته شده نسبت داد [9]. بعلاوه، باید اهمیت سایر عوامل از جمله نرخ اعمال حرارت، نوع سنگدانه‌ها، طرح اختلاط بتن، نوع و میزان الیاف، سن و نحوه عمل‌آوری بتن در نظر گرفته شود تا بتوان به نتیجه‌ای جامع رسید.

می‌توان گفت که رفتار بتن الیافی تحت اثر حرارت‌های بالا ناشی از عوامل گوناگونی بوده که هر یک باید به صورت جداگانه و یا به صورت ترکیبی با سایر عوامل مورد ارزیابی قرار گیرد. تاکنون تحقیقی که به صورت جامع عوامل دخیل بر رفتار بتن الیافی در اثر حرارت‌های بالا را به صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار دهد، انجام نشده است. در این تحقیق سعی بر آن است با ساخت و آزمایش نمونه‌های متعدد آزمایشگاهی بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، تأثیر هم‌زمان برخی از این عوامل از جمله نسبت آب به سیمان، نوع الیاف، میزان الیاف، سن و حرارت‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی مشخص شده و نتایج این تحقیق مسیر را برای اطلاع هر چه بیشتر از رفتار این نوع بتن تحت آتش سوزی هموار نماید (شکل 2). با این وجود، تحقیق حاضر محدودیت‌هایی نظیر عدم بررسی حرارت‌های بالاتر از 800°C ، عدم بررسی نوع سیمان‌های مختلف، و عدم بررسی محدوده وسیعی از نسبت‌های آب به سیمان را دارد. میزان بهبود ضعف بتن در کشش با استفاده از الیاف مختلف، همچنین ارزیابی تأثیر حرارت‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی، و در نهایت بررسی این موارد برای بتن‌های با عیار سیمان مختلف می‌تواند منجر به ارائه نتایجی شود که مهندسان ساختمان می‌توانند از آن برای

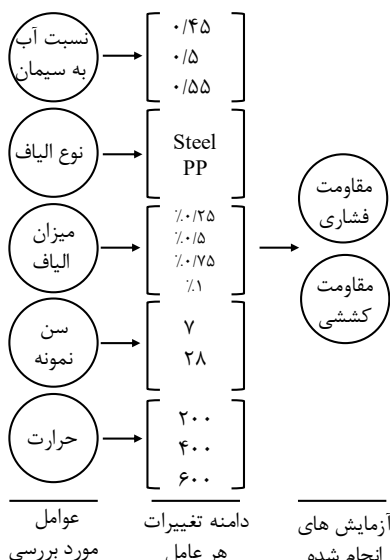
تخمین میزان افزایش مقاومت کششی بتن یافی با عیارهای مختلف سیمان و همچنین میزان کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن یافی (با الیاف مختلف)، استفاده کنند.

جدول 1: تحقیقات صورت گرفته در زمینه تأثیر حرارت‌های بالا بر بتن یافی.

نام محقق	سال	مرجع	نوع بتن	پارامتر مورد بررسی	الیاف	خلاصه نتیجه
چان و همکاران	2000	[10]	توانمند و معمولی	مقاومت فشاری	فولادی	افزایش مقاومت پسماند بتن توانمند نسبت به بتن معمولی.
چن ولیو	2004	[11]	پرمقاومت	قلوه کن شدن	پلی پروپیلن و فولادی	بتن پرمقاومت یافی در دمای بالاتری قلوه کن می‌شود.
پون و همکاران	2004	[12]	توانمند	مقاومت فشاری	پلی پروپیلن و فولادی	دو برابر شدن ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها با استفاده از الیاف فولادی.
هان و همکاران	2005	[13]	توانمند	قلوه کن شدن	پلی پروپیلن	قلوه‌کن شدن در نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن بیشتر از 0/05٪ حجمی رخ نداد.
پنگ و همکاران	2006	[14]	توانمند	مقاومت پسماند و قلوه کن شدن	فولادی، پلی پروپیلن و ترکیبی	افزایش چشمگیر مقاومت در برابر قلوه کن شدن.
آیدین و همکاران	2008	[15]	پرمقاومت	مقاومت فشاری	پلی پروپیلن و فولادی	برای ممانعت از قلوه کن شدن، میزان بهینه مصرف الیاف برای بتن معمولی و پرمقاومت به ترتیب 0/2 و 0/1 درصد تعیین شد.
کیم و همکاران	2013	[16]	معمولی	مقاومت پسماند	پلی پروپیلن	سطح مقطع الیاف پلی پروپیلن می‌تواند بر روی خصوصیات مکانیکی پسماند نمونه‌های بتنی تأثیر گذاشته و خطر قلوه کن شدن را تا حد زیادی بر طرف کند.
چن و همکاران	2014	[17]	بازیافتی	مقاومت فشاری	فولادی	افزایش دادن الیاف فولادی در ممانعت از قلوه کن شدن مفید می‌باشد و می‌تواند موجب بهبود شکل پذیری و ترک خوردگی بتن بازیافتی شود.
نیو و همکاران	2015	[18]	پرمقاومت	خمشی	پلی پروپیلن	الیاف پلی پروپیلن استفاده شده در بتن پرمقاومت اثر منفی بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی داشت. در این بررسی با استفاده هم‌زمان الیاف ریز و درشت پلی پروپیلن توانستند بر این کاستی غلبه کنند.
شیخ و همکاران	2016	[19]	ژئوپلیمری	فشاری و کششی	فولادی	مقاومت پسماند بیشتر بتن ژئوپلیمری بر پایه سدیم نسبت به بتن بر پایه پتاسیم
چومانیدیس و همکاران	2016	[20]	معمولی	خمشی	پلی پروپیلن و فولادی	اگر چه استفاده از الیاف ترکیبی می‌تواند منجر به بهبود مقاومت کششی و طاقت نمونه‌های بتن در حرارت‌های بالا شود، استفاده از الیاف فولادی منجر به عملکردی مطلوب تر در رفتار پس از ترک خوردگی خواهد شد.
مالوک و همکاران	2017	[21]	توانمند	قلوه کن شدن	پلی پروپیلن	علاوه بر میزان مصرف الیاف در بتن، عوامل دیگری نظیر سطح مقطع الیاف و طول آنها می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر رفتار بتن توانمند داشته باشد.
قلهکی و همکاران	2017	[22]	معمولی	مقاومت فشاری، کششی، خمشی	پلی پروپیلن و فولادی	مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف فولادی از نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن بیشتر بود.
آمانسیو و همکاران	2018	[23]	معمولی	مقاومت فشاری	فولادی	وجود الیاف موجب بهبود مقاومت فشاری می‌شود ولی تأثیری بر روی کاهش جرم نمونه‌های حرارت دیده نداشت.
پاچیده و همکاران	2018	[24]	معمولی	مقاومت فشاری و کششی	فولادی	نمونه‌های حاوی 0/2٪ الیاف بهترین عملکرد را داشتند.
بوزنیباک و همکاران	2019	[25]	معمولی	فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته	فولادی و ترکیبی	مقاومت فشاری بتن معمولی حاوی الیاف فولادی و ترکیبی در تمامی حرارت‌ها بیشتر از نمونه بتن معمولی بود. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن یافی بیشتر از نمونه بتن معمولی بود. این افزایش تا 150٪ در نمونه‌های یافی مشاهده شد.
عیدان و همکاران	2019	[26]	معمولی	فشاری، کششی و مدول الاستیسیته	پلی پروپیلن	الیاف پلی پروپیلن عملکرد بهتری در مقایسه با بتن معمولی داشت. مقداری بهنه برای این الیاف می‌توان متصور بود.
فورو و همکاران	2020	[27]	معمولی	فشاری و ریزساختار	فولادی	خصوصیات مکانیکی بتن حاوی الیاف و سرباره کوره آهنگدازی به مراتب بیشتر از نمونه بتن معمولی بود. ریزساختار نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر زیادی میکروتورک هستند.
پاچیده و قلهکی	2019	[28]	معمولی	مقاومت فشاری، کششی، خمشی	پلی پروپیلن و فولادی	مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف فولادی از نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن بیشتر بوده و مقاومت خمشی تقریباً یکسان است.
خان و همکاران	2022	[29]	معمولی	تنش-کرنش، ریزساختار	بازالت	عملکرد الیاف بازالتی در بهبود رفتار بتن به صورت کلی مناسب می‌باشد.



شکل 1: تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی نسبت مقاومت فشاری پسماند برای انواع مختلف الیاف.



شکل 2: روندنمای تحقیق حاضر.

2- مواد و روش‌ها

2-1- سیمان

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ I-425 (سیمان معمولی) کارخانه سیمان ایلام استفاده شد. آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی، طبق استانداردهای ملی ایران بر روی این سیمان صورت گرفت. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نظر مرغوبیت و سلامت در محدوده قابل قبول قرار دارد. در این تحقیق از آب شرب استفاده شد که PH آن بین 8 تا 8/5 بود.

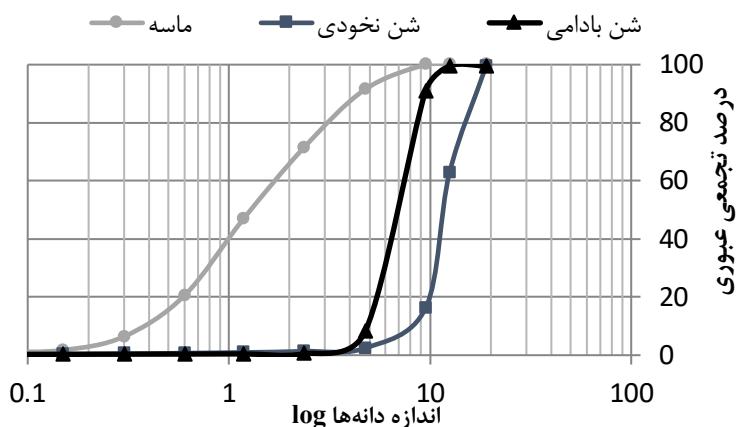
جدول 2: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی.

C4AF	C3A	C2S	C3S	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	IR	L.O.I	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	مشخصات شیمیایی
12/1	26/8	2/25	24/47	0/21	0/6	1	0/2	2	4	61/4	3/1	5/8	21/6	
درصد اتوکلاو		مقاومت 28 روزه (kg/m ²)	مقاومت 7 روزه (kg/m ²)	مقاومت 2 روزه (kg/m ²)	گیرش نهایی (دقیقه)	گیرش اولیه (دقیقه)	%باقیمانده روی الک 4500	%باقیمانده روی الک 900	نرمی سیمان (cm ² /g)	مشخصات فیزیکی				
0/04		490	350	175	198	100	8/1	1/3	3500					

2-2- مصالح دانه‌ای و آزمایش‌های مرغوبیت مصالح

در این تحقیق، ماسه مورد استفاده در ساخت بتن‌های آماده شرکت خانه‌سازی، از معادن طبیعی کرمانشاه که رودخانه‌ای و از نوع شسته می‌باشد، تهیه شد. دانه‌بندی این نوع مصالح سنگی ریزدانه در شکل 3 نشان داده شده است. مدول نرمی ماسه برابر 3 و مقدار وزن

مخصوص ظاهری 2/61 و وزن مخصوص حقیقی 2/54 تن بر متر مکعب به دست آمد. درشت دانه مورد استفاده در ساخت بتن، از ترکیب بادامی و نخودی می باشد. وزن مخصوص این شن برابر 1/4 گرم بر سانتی متر مکعب در حالت آزاد و 1/3 گرم بر سانتی متر مکعب در حالت میله خورده است.



شکل 3: دانه بندی ماسه و شن مصرفی.

2-3- الیاف

الیاف استفاده شده در این تحقیق از شرکت میسون تهیه شد. الیاف پلی پروپیلن مصرفی دارای وزن مخصوص 0/91 کیلوگرم بر مترمکعب بوده و مقاومت کششی در حدود 230 مگاپاسکال دارد. مدول الاستیسیته این الیاف در حدود 2/2 گیگاپاسکال می باشد. اندازه برش این الیاف بین 6 تا 18 میلیمتر متغیر بوده و قطر الیاف نیز 35 میکرون می باشد. وزن مخصوص الیاف فولادی مصرفی 7800 کیلوگرم بر مترمکعب بوده و دارای مقاومت کششی 1100 مگاپاسکالی می باشند. مدول الاستیسیته این الیاف دقیقاً مشابه با فولاد ساختمانی و برابر 203 گیگاپاسکال می باشد. طول الیاف مصرفی برابر 3 سانتیمتر و ضخامت آنها برابر 0/55 میلیمتر بود.

2-4- طرح اختلاط بتن طبق استاندارد ACI-211 و ساخت نمونه

بعد از انجام آزمایش‌های مرغوبیت مصالح بتن و کنترل آن‌ها با مشخصات ذکر شده در استانداردهای مربوطه، طرح اختلاط نمونه‌های استوانه‌ای بتن طبق استاندارد [30] ACI-211 صورت می‌گیرد. در این تحقیق از 3 طرح اختلاط از بتن آماده مصرفی در سطح شهر، به منظور مسلح سازی با الیاف مختلف و درصد‌های مختلف بتن الیافی استفاده شد. هر یک از این سه طرح، دارای عیار مختلفی از سیمان بوده و در جدول 3 آورده شده است. در نام گذاری نمونه‌ها، عدد آورده شده به منزله عیار سیمان می باشد.

جدول 3: طرح اختلاط بتن‌های آماده مصرفی.

نام نمونه	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)
S350	350	195	1084	735
S400	400	197	1055	645
S450	450	200	1025	695

در تهیه مخلوط‌های بتن آماده، مصالح به صورت اشباع با سطح خشک مورد استفاده قرار گرفتند. قبل از وارد شدن مصالح سنگی به داخل مخلوط کن بچینگ مستقر در کارخانه، ابتدا جداره آن مرطوب شده تا رطوبت سنگ‌دانه‌ها را تغییر نیابد و پس از آن ماسه و سیمان، در مخلوط کن ریخته شده و به مدت یک دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس در حدود نصف آب طرح اختلاط به مصالح اضافه شد تا یک مخلوط همگن به دست آید و عمل مخلوط کردن به مدت دو دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. بعد از این مدت سنگ‌دانه‌های درشت به مخلوط کن اضافه شده و در حالی که باقیمانده آب نیز به آرامی به مخلوط کن اضافه می‌شود، عمل مخلوط کردن تا سه دقیقه دیگر ادامه می‌یابد تا بتنی با کیفیت و کارایی مناسب بدست آید. بتن حاصل سپس به کامیون مخلوط کن منقل شده و به محل آزمایشگاه که در

نزدیکی بچینگ کارخانه مستقر بود، انتقال یافت. بتن از کامیون به میزان مورد نیاز به درون محفظه‌هایی منتقل شد و سپس برای هر طرح اختلاط (با عیار سیمان ثابت)، به میزان مورد نیاز جهت پر کردن قالب‌های فشاری و کششی، بتن به داخل مخلوط کن ریخته شد. در این مرحله الیاف مورد استفاده در طرح‌ها به آرامی و به تدریج به بتن اضافه گردید و برای به‌دست آوردن یک بتن با کارایی مناسب و اطمینان از پخش یکنواخت الیاف در بتن، اختلاط به مدت پنج دقیقه دیگر ادامه یافت.

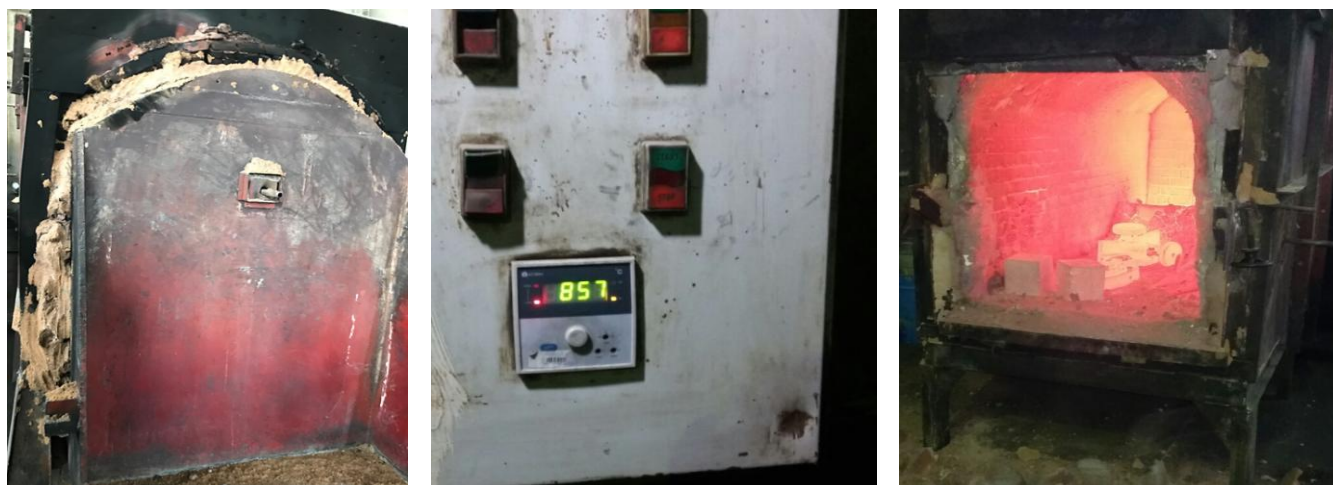
از آنجایی که در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، بند 9-9-3-4 در مورد اجرای بتن الیافی و افزودن الیاف به مخلوط کن و یا کامیون حمل بتن توضیحاتی آورده شده است، بنابراین توجه به این موضوع اهمیت ویژه‌ای می‌یابد و نشان می‌دهد که می‌توان از الیاف فلزی یا پلی‌پروپیلن به منظور مقاوم سازی بتن استفاده کرد. در بند 9-9-3-4-1 مبحث نهم مقررات ملی اشاره شده است که افزودن الیاف به مخلوط کن و یا کامیون حمل بتن به دو روش به شرح زیر مجاز است:

الف) ابتدا مخلوط بتن آماده شود و سپس الیاف به تدریج به مخلوط اضافه شود. در این روش، پس از افزودن کامل الیاف، باید چرخش جام به مدت 5 دقیقه با سرعت کم ادامه یابد.

ب) الیاف همراه با سنگدانه به جام مخلوط کن تغذیه شود و سپس بقیه مصالح مخلوط اضافه شود [31].

برای ساخت بتنی الیافی و قابل کاربرد از روش اول استفاده شد تا علاوه بر بررسی عملی بودن روش پیشنهادی در مبحث نهم مقررات ملی ایران، تأثیر استفاده از الیاف مختلف نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقررات و در بند 9-9-3-2-5 عنوان شده است که برای جلوگیری از قلوه‌کن شدن بتن در هنگام آتش‌سوزی، باید از الیاف پلی‌پروپیلن به مقدار 0/35 درصد حجم بتن استفاده شود. تشخیص ضرورت مقاومت در برابر آتش‌سوزی به عهده کارفرماست [31]. از این رو یکی دیگر از اهداف تحقیق حاضر را می‌توان ارزیابی بند 9-9-3-2-5 مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران در مورد تأثیر آتش‌سوزی بر بتن الیافی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن عنوان کرد.

به منظور اعمال حرارت‌های مورد نظر به جهت بررسی تأثیر این عامل بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی، از کوره قوس الکتریکی بهره برده شد. کوره مورد استفاده در سوله شرکت گیره ساز غرب واقع بوده و از آن برای ساخت قطعات فلزی استفاده می‌شود. این کوره‌ها قادرند دمایی تا 1500°C به نمونه‌ها اعمال کنند. از این کوره‌ها برای حرارت دادن به فلزات جهت افزایش مقاومت و به اصطلاح آبدیده کردن آنها استفاده می‌شود. به منظور ثبت حرارت اعمالی، از ترموکوپل‌های سرامیکی استفاده شد. نمایی از کوره و ترموکوپل استفاده شده در شکل 4 نشان داده شده است. حرارت اعمال شده به نمونه‌ها به صورت غیر مستقیم بوده و این حرارت توسط دستگاه کنترل دیجیتالی تعبیه شده در کنار کوره قابلیت برنامه ریزی، کنترل و بازبینی داشت. سعی شد حرارت اعمالی به نمونه‌ها مطابق با پروفیل بارگذاری ASTM E119 باشد. پس از قرارگیری نمونه‌های بتنی در داخل کوره، درب آن با استفاده از ماسه نسوز کامل پوشانده شد تا از تبادل حرارت با محیط اطراف تا حد امکان جلوگیری به عمل آمده و کارایی و راندمان کوره افزایش یابد (شکل 4-ج).



شکل 4: تصویری از الف) کوره استفاده شده، ب) ترموکوپل دیجیتال و قابل برنامه ریزی کوره، ج) پوشاندن درب کوره با استفاده از ماسه نسوز.

3- نتایج

آزمایش‌هایی مانند اسلامپ، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه و مقاومت کششی بر روی نمونه‌های بتن تازه و سخت‌شده صورت گرفت. در این میان با تغییر میزان الیاف، نوع الیاف، سن نمونه‌ها، میزان حرارت اعمالی و میزان سیمان موجود در طرح اختلاط سعی شد تأثیر این پارامترها بر رفتار بتن الیافی تحت اثر حرارت‌های بالا ارزیابی شود. در ادامه، ابتدا نتایج مربوط به آزمایش اسلامپ عنوان گردیده و سپس نتایج مقاومت فشاری و کششی تبیین می‌گردد. در نام‌گذاری نمونه‌ها، عدد اول بیانگر عیار بتن بوده و حرف بعد از این عدد نیز نشان دهنده نوع الیاف مصرفی بوده به‌نحوی که S معرف الیاف فولادی و P بیانگر الیاف پلی‌پروپیلن است. عدد دوم بیانگر میزان الیاف مصرفی در نمونه‌های بتنی می‌باشد؛ برای مثال نمونه 400P0.25 به منزله نمونه بتنی با عیار $400 \frac{kg}{m^3}$ و حاوی 0.25٪ الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد.

3-1- کارایی بتن

از آزمایش اسلامپ برای اندازه‌گیری روانی و پمپ‌پذیری بتن استفاده می‌شود. در شکل 5 تصویری از نتایج اسلامپ برای نمونه‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن الیاف به بتن، صرف‌نظر از نوع بتن و عیار آن، میزان روانی بتن کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به قفل و بست بیشتر الیاف و درگیر شدن الیاف با سنگدانه‌ها به منظور ممانعت از فروریزش مخروط بتنی نسبت داد. بعلاوه، با افزایش عیار سیمان و افزایش میزان مصرفی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، کاهش اسلامپ رخ داد.

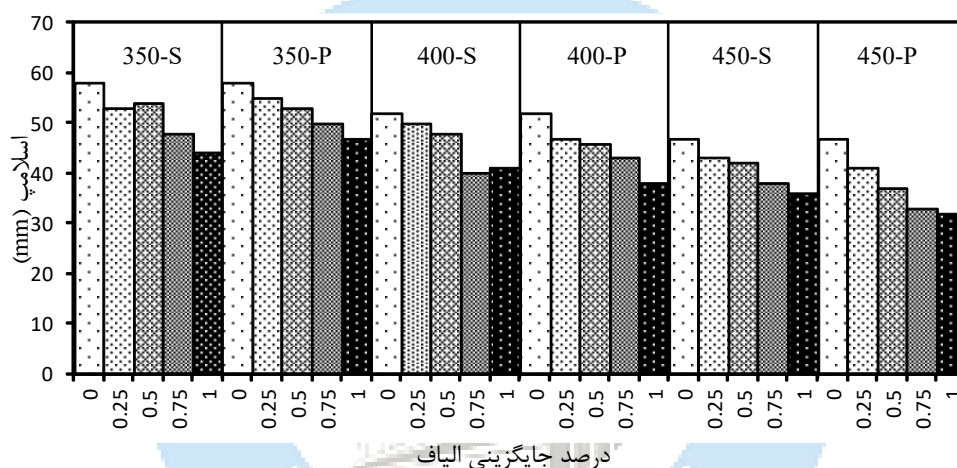
به منظور بررسی تأثیر نوع الیاف مصرفی بر تغییرات اسلامپ، اسلامپ نمونه‌های حاوی دو نوع الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن مقایسه شد. نتایج نشان داد که الیاف فلزی، صرف‌نظر از نوع بتن و میزان سیمان استفاده شده در طرح اختلاط، موجب کاهش 14/5 درصدی در اسلامپ بتن نسبت به نمونه کنترلی با همان عیار سیمان خواهد شد. میزان کاهش اسلامپ به دلیل مصرف الیاف پلی‌پروپیلن برابر 17/3 درصد می‌باشد. می‌توان گفت الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط مشابه، منجر به کاهش بیشتر اسلامپ در نمونه‌های بتنی خواهد شد. دلیل این امر را می‌توان به مشخصات فیزیکی این الیاف نسبت داد که با قطر کمتر و دارا بودن منافذ موئینه بیشتر نسبت به الیاف فولادی موجب می‌شود قابلیت بیشتری در محبوس کردن آب آزاد بتن در خود را داشته باشند و همین امر می‌تواند موجب خشک‌تر شدن بتن و کاهش بیشتر اسلامپ در این نمونه‌ها نسبت به مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف فولادی گردد. با این حال، اختلاف چندانی بین کاهش اسلامپ به دلیل استفاده از انواع مختلف الیاف وجود نداشته و می‌توان گفت الیاف مصرفی، تقریباً به یک میزان موجب کاهش اسلامپ نمونه‌ها شده‌اند.

با بررسی میزان روانی نمونه‌های بتنی حاوی الیاف به منظور ارزیابی تأثیر عیار سیمان، مشاهده شد که نمونه‌های ساخته شده با 350، 400 و 450 کیلوگرم سیمان در هر مترمکعب به ترتیب کاهش روانی به میزان 12/9، 15/1 و 19/6 درصد، صرف‌نظر از نوع الیاف و میزان مصرف آنها، تجربه کردند. بنابراین، می‌توان گفت نمونه حاوی 1 درصد الیاف پلی‌پروپیلن، با عیار 450 کیلوگرم سیمان در هر

مترمکعب باید کمترین میزان روانی را در میان نمونه‌های بررسی شده داشته باشد؛ این نمونه اسلامی برابر با 32 میلیمتر داشت که در مقایسه با نمونه کنترلی، یعنی فاقد الیاف، نشان از کاهش 21/9 درصدی دارد.

3-2- مقاومت فشاری نمونه‌ها

مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی 150 میلیمتری انجام شد. زمانی که نمونه‌ها به دمای مورد نظر رسیدند، از کوره خارج شده و پس از سرد شدن در محیط کارگاه، تحت آزمایش مقاومت فشاری استاندارد قرار گرفتند. می‌توان نمونه‌ها را پس از خارج کردن از کوره با استفاده از عایق‌هایی پوشاند و مقاومت فشاری در همان دمای اعمالی را بدست آورد اما بنا به دلایلی نظیر کمبود امکانات، خطرناک بودن انجام آزمایش و ... از انجام این آزمایش صرف‌نظر شد و تنها مقاومت فشاری نمونه بتنی حرارت دیده در دمای محیط تعیین شد. در شکل 6-الف نحوه انتقال نمونه‌های بتنی به داخل کوره، در شکل 6-ب، این نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه و در شکل 6-ج نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.



شکل 5: خلاصه نتایج آزمایشگاهی اسلامپ نمونه‌های تکی.



ج



ب



الف

شکل 6: (الف) نحوه انتقال نمونه‌ها به داخل کوره، (ب) محل قرارگیری نمونه‌های بتنی در محیط آزمایشگاه، و (ج) نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری.

در شکل 7 تا 9 نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های مختلف، در اثر حرارت‌های اعمالی آورده شده است. به منظور بررسی تأثیر حرارت بر روی نمونه‌ها، از 4 دمای مختلف، یعنی دمای محیط، 200، 400 و 600 درجه سانتیگراد استفاده شد. از دماهای بیشتر به دلیل نتیجه بسیار مخرب بر روی نمونه‌های بتنی استفاده نشد. در این اشکال، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه به صورت مجزا آورده شده است تا امکان مقایسه با سهولت بیشتری فراهم گردد. در نمودارهای ستونی، قسمت‌هایی که فاقد داده برای مقاومت فشاری است، بیانگر تخریب نمونه ناشی از قلوه‌کن شدن بتن می‌باشد. در شکل 6 تصویری از نمونه‌های قلوه‌کن شده نشان داده شده است.

جزئیات نتایج آزمایش‌ها در جدول 4 آورده شده است. تمامی اعداد و نتایج بر حسب مگاپاسکال بوده و منظور از Spalling در برخی قسمت‌های جدول، قلوه‌کن شدن بتن و خرد شدن نمونه بتنی به نحوی که امکان انجام آزمایش وجود نداشت، می‌باشد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، استفاده از الیاف فلزی در نمونه‌های با عیار سیمان $350 \frac{kg}{m^3}$ در سن 7 روزه و در دمای محیط منجر به افزایش 10/3 درصدی به طور میانگین می‌شود. این افزایش مقاومت فشاری 7 روزه با افزایش میزان الیاف، کاهش می‌یابد. روندی مشابه برای مقاومت فشاری 28 روزه نمونه‌های بتن الیافی با عیار $350 \frac{kg}{m^3}$ مشاهده شد. میزان افزایش مقاومت فشاری به دلیل استفاده از الیاف فلزی به طور میانگین 10/1 درصد بود.

روندی کاملاً متضاد برای نمونه‌های بتنی الیافی ساخته شده با الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده شد به نحوی که استفاده از این الیاف منجر به کاهش مقاومت فشاری 7 و 28 روزه به طور متوسط به ترتیب به میزان 13/7 و 2/6٪ شد. دلیل کاهش مقاومت را می‌توان به خصوصیات مکانیکی خود الیاف نسبت داد. الیاف فلزی با دارا بودن از قطر و تنش تسلیم بیشتر نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن می‌توانند نیروی بیشتری در هنگام اعمال فشار بر نمونه‌های بتنی تحمل کنند [16 و 32].

نتایج مربوط به نمونه‌های الیافی حاوی الیاف فلزی با عیار 400 و 450 در سن 7 روزه، به طور میانگین نشان از کاهش 10 و 17٪ مقاومت فشاری داشتند. دلیل این امر را می‌توان به کمبود آب در بتن و تخلخل و ضعف ایجاد شده ناشی از کلوخه شدن الیاف فلزی نسبت داد. همان‌طور که از جدول 4 بر می‌آید، نمونه‌های با نسبت کمتر الیاف، بهبود مقاومت داشته‌اند در حالی که با افزایش میزان الیاف فلزی، مقاومت فشاری 7 روزه کاهش می‌یابد. روندی مشابه اما با شدت کمتر برای نمونه‌های 28 روزه مشاهده شد. پیشرفت بیشتر فرآیند هیدراتاسیون و آگیری ذرات سیمان را می‌توان از جمله عوامل دخیل در افزایش مقاومت نمونه‌های 28 روزه و کاهش میزان تأثیرات منفی الیاف فلزی در مقاومت آنها دانست. میزان کاهش مقاومت فشاری 28 روزه نمونه‌های حاوی الیاف فلزی برای عیار 400 و 450 به طور میانگین برابر است با 0/6 و 2/8 درصد.

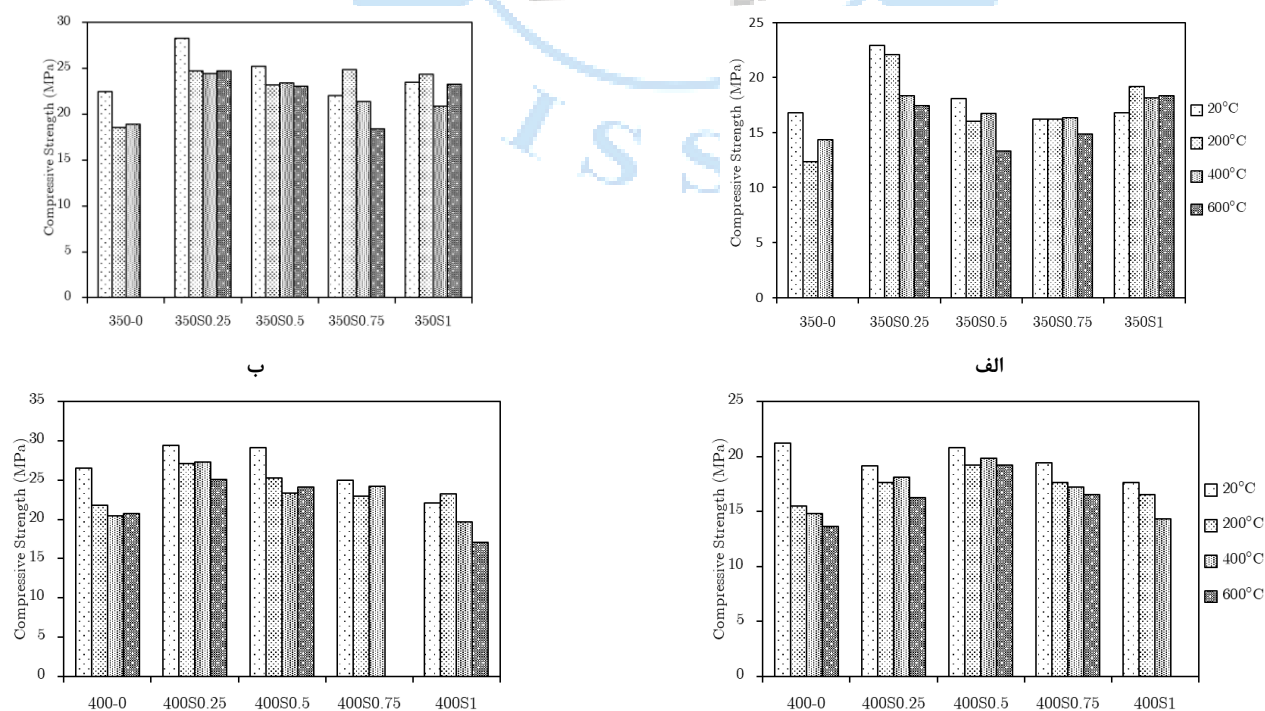
جدول 4: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی (تمامی واحدها بر حسب MPa هستند).

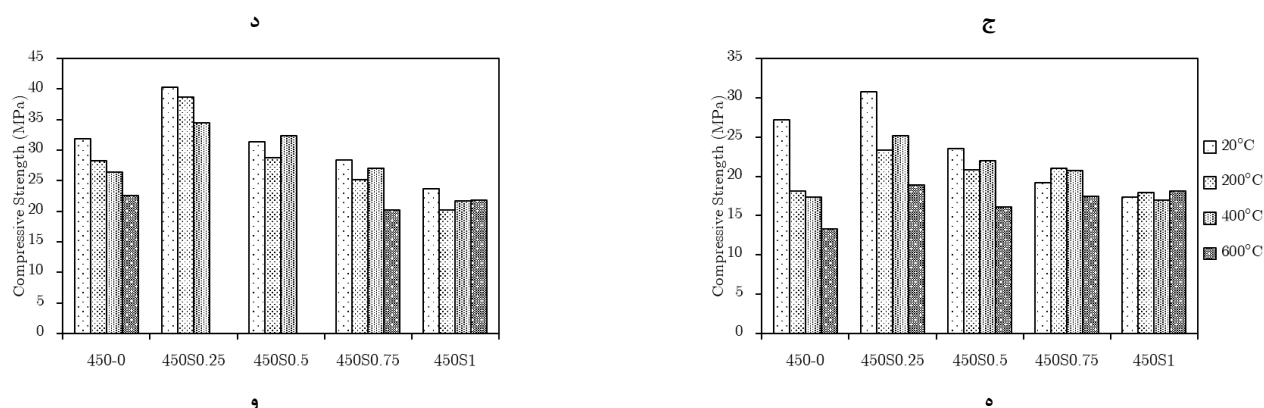
نام نمونه	دما سن	20 °C		200 °C		400 °C		600 °C	
		7-day	28-day	7-day	28-day	7-day	28-day	7-day	28-day
350-0		16/78	22/48	12/35	18/53	14/35	18/88	Spalling	Spalling
350S0.25		22/9	28/31	22/1	24/71	18/35	24/4	17/47	24/71
350S0.5		18/11	25/21	16/02	23/2	16/71	23/45	13/33	23/05
350S0.75		16/24	22/05	16/2	24/85	16/34	21/36	14/85	18/43
350S1		16/8	23/51	19/2	24/35	18/14	20/84	18/32	23/28
350-0		16/78	22/48	12/35	18/53	14/35	18/88	Spalling	Spalling
350P0.25		15/2	22/31	13/42	22/08	14/36	22/13	12/94	20
350P0.5		16/32	22/91	16/44	21/18	17/12	22/37	16/36	19/75
350P0.75		15/52	21/18	16/31	22/42	15/04	20/18	14/1	20/34
350P1		10/9	21/18	13/5	18/04	12/17	16/88	11/34	15/15
400-0		21/24	26/55	15/47	21/77	14/78	20/48	13/65	20/75
400S0.25		19/18	29/37	17/65	27/14	18/15	27/32	16/23	25/07
400S0.5		20/82	29/14	19/24	25/22	19/85	23/33	19/24	24/12
400S0.75		19/45	24/94	17/66	22/95	17/25	24/22	16/55	Spalling
400S1		17/65	22/12	16/54	23/25	14/33	19/63	Spalling	17/02

400-0	21/24	26/55	15/47	21/77	14/78	20/48	13/65	20/75
400P0.25	21/34	26/24	22/84	26/38	20/19	27	17/68	26/42
400P0.5	22/14	25/33	20/17	25/77	21/35	26/34	18/32	23/84
400P0.75	18/03	23/17	18/65	24/03	22/37	23/86	17/32	21/23
400P1	21/74	24/32	17/13	22/12	18/17	22/73	14/54	19/72
450-0	27/16	31/82	18/1	28/22	17/4	26/4	13/3	22/57
450S0.25	30/8	40/26	23/35	38/7	25/16	34/48	18/9	Spalling
450S0.5	23/51	31/36	20/84	28/71	22/03	32/38	16/13	Spalling
450S0.75	19/18	28/44	21/05	25/14	20/72	27/04	17/42	20/2
450S1	17/33	23/73	17/91	20/26	16/95	21/73	18/12	21/82
450-0	27/16	31/82	18/1	28/22	17/4	26/4	13/3	22/57
450P0.25	25/33	36/22	25/1	31/73	23/05	28/71	19/1	28/04
450P0.5	22/11	31/85	21/33	26/88	23/14	31/17	15/85	22/05
450P0.75	24/7	32/32	23/31	27/15	22/25	26/65	18/27	21/14
450P1	20/95	31/91	24/49	31/55	20/54	28/04	19/2	22/26

در نمونه‌های حرارت دیده، استفاده از الیاف فلزی در سن 7 و 28 روزه در بتن با عیار 350، منجر به بهبود مقاومت فشاری نمونه‌هایی که 200 درجه سانتیگراد حرارت دیده اند، به ترتیب به میزان 48/8 و 31٪ شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر الیاف فلزی در دمای 200 درجه به میزان چشمگیری بیشتر از حالتی است که نمونه‌ها در دمای محیط آزمایش می‌شوند. با افزایش عیار سیمان، از میزان اثربخشی الیاف فلزی در بهبود مقاومت فشاری کاسته می‌شود. میزان افزایش مقاومت فشاری برای عیار 400 و 450 به طور متوسط برابر است با 14/8 درصد در سن 7 روزه. این میزان برای نمونه‌های 28 روزه برابر است با 13٪ افزایش برای نمونه‌های ساخته شده با عیار 400 و بدون تغییر (صفر درصد) برای نمونه‌های ساخته شده با عیار 450.

استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه‌هایی که 200 درجه سانتیگراد حرارت دیده اند، موجب افزایش 20، 27 و 30 درصدی مقاومت فشاری 7 روزه نسبت به نمونه کنترلی شده‌اند. دلیل افزایش مقاومت را می‌توان به وجود آب اضافه در الیاف پلی‌پروپیلن نسبت داد که سبب می‌شود عمل آوری داخلی در این نمونه‌ها رخ داده و مقاومت‌ها بهبود داشته باشند. با این حال، این الیاف مقاومت 28 روزه نمونه‌های با عیار 350، 400 و 450 را به ترتیب به میزان 13، 12/8 و 3/9 درصد بهبود می‌دهند.

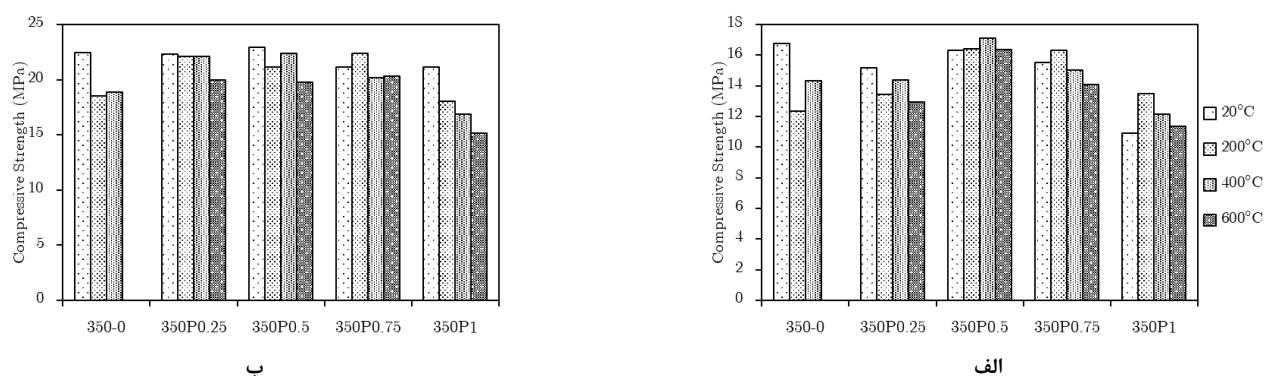


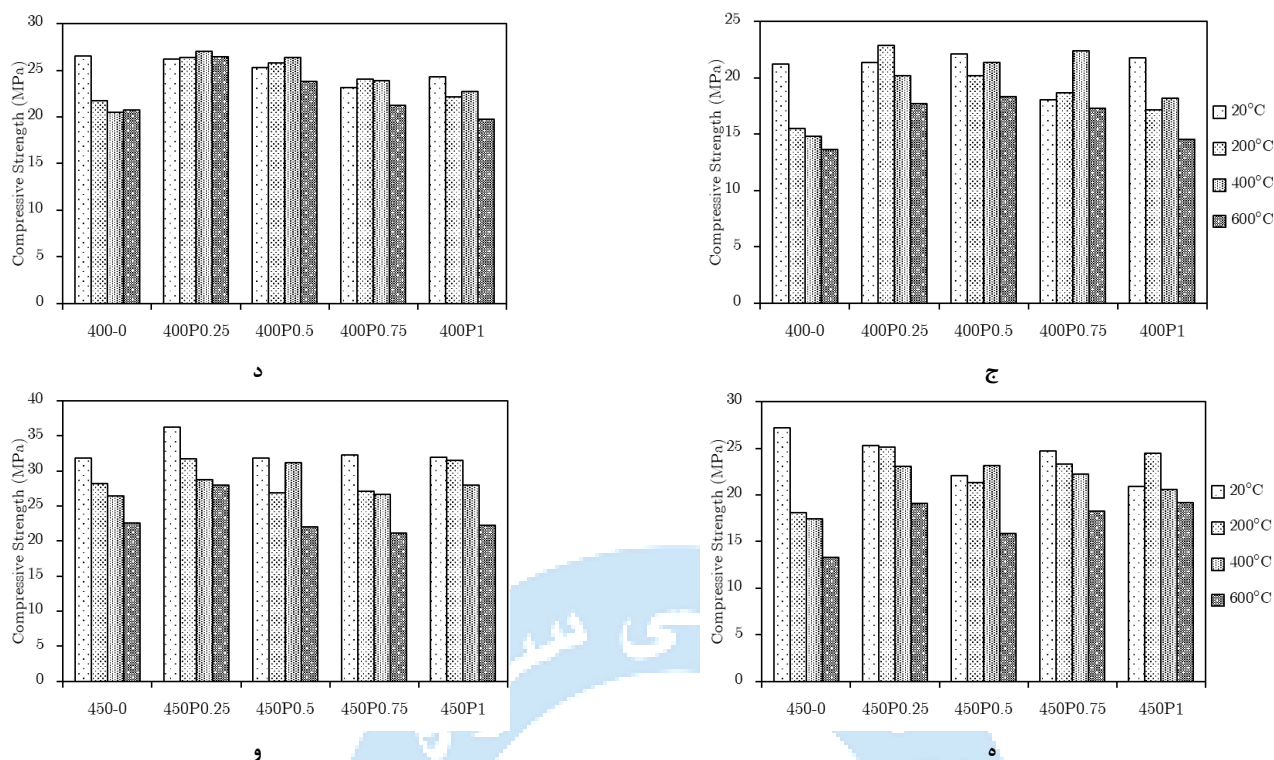


شکل 7: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی با عیار الف) 350 در سن 7 روزه، ب) 350 در سن 28 روزه، ج) 400 در سن 7 روزه، د) 400 در سن 28 روزه، ه) 450 در سن 7 روزه، و) 450 در سن 28 روزه.

با افزایش درجه حرارت اعمالی به نمونه‌های بتن الیافی، مقاومت‌های فشاری ثبت شده کاهش چشمگیر داشتند. با این حال، تأثیر اضافه کردن الیاف در ممانعت از کاهش مقاومت فشاری نیز قابل توجه بود به نحوی که افزودن مقادیر مختلف الیاف فولادی به نمونه‌های با عیار 350، 400 و 450 در سن 7 روزه به ترتیب منجر به افزایش 21/1، 17/7 و 21/9 درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترلی در هر عیار گردید. این مقادیر برای الیاف پلی پروپیلن تحت حرارت 400 درجه برای عیارهای مختلف سیمان به ترتیب 2/2، 38/8 و 27/8 درصد بود که نشان از عملکرد بهتر این الیاف در برابر حرارت‌های بالا در قیاس با الیاف فولادی دارد. با افزایش سن، این نسبت‌ها برای الیاف فولادی و عیارهای 350، 400 و 450 به ترتیب و به طور متوسط برابر 19/2، 15/3 و 9/5 درصد بود. عملکرد الیاف پلی پروپیلن در این سن نیز برای عیارهای مختلف به ترتیب، 8، 22 و 8/5 درصد افزایش از خود نشان داد.

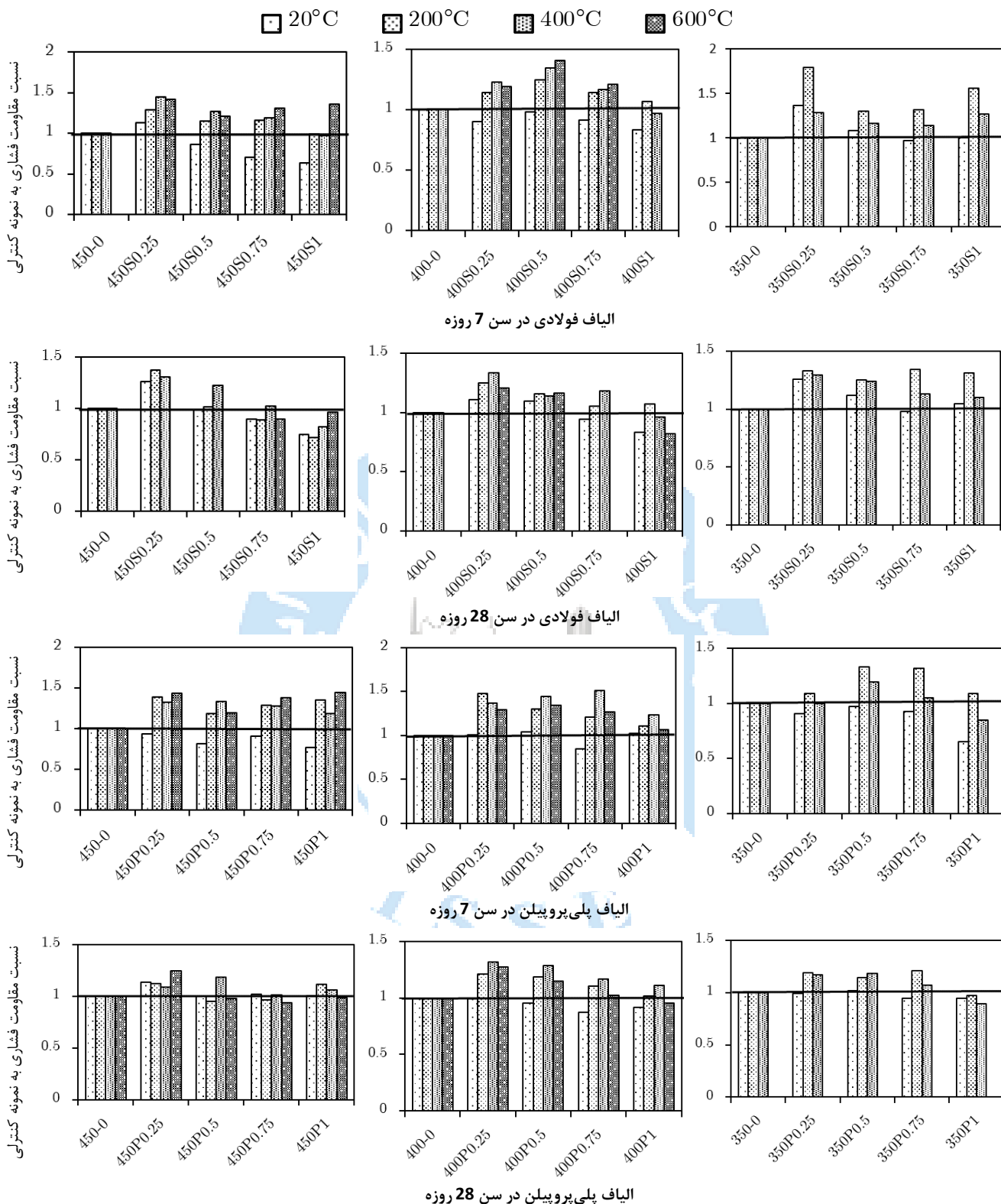
اعمال حرارت 600 درجه‌ای به نمونه‌های بتنی با عیار 350 و حاوی الیاف فولادی در سن 7 روزه منجر به افزایش مقاومت به میزان 7/6 درصد شد. این افزایش برای عیار 400 و 450 به ترتیب 6/7 و 5/5 درصد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کارایی الیاف فولادی در عیارهای کم برای حرارت‌های بالا چشمگیرتر می‌باشد. الیاف پلی پروپیلن عملکردی تقریباً مشابه داشته و می‌توان گفت کارایی آن‌ها در حرارت‌های بالا مستقل از میزان سیمان مصرفی در بتن می‌باشد. میزان افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های 7 روزه حاوی الیاف پلی پروپیلن با عیار 350، 400 و 450 به ترتیب 6/7، 6/3 و 5/9 درصد بود.





شکل 8: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با عیار الف (350 در سن 7 روزه، ب) 350 در سن 28 روزه، ج) 400 در سن 7 روزه، د) 400 در سن 28 روزه، ه) 450 در سن 7 روزه، و) 450 در سن 28 روزه.

با افزایش حرارت به 600 درجه سانتیگراد، برخی از نمونه‌های بتنی قلوه کن شده و با حالتی انفجاری در هنگام خروج از کوره، تخریب شدند. دلیل این امر را می‌توان به بخار آب محبوس شده در داخل حجم بتن نسبت داد که در هنگام عدم وجود راه فرار، موجب تخریب ناگهانی بتن می‌شود. این نوع خرابی که تصویری از آن در شکل 6 نشان داده شده است در نمونه‌های 350-0 در هر دو سن 7 و 28 روزه، 450-S0.75 در سن 28 روزه، نمونه 450-S1 در سن 7 روزه، و نمونه‌های 450-S0.25 و 450-S0.5 در سن 28 روزه رخ دادند. همان‌طور که می‌توان دید، خرابی از نوع قلوه کن شدن در نمونه‌های با الیاف پلی‌پروپیلن رخ نداده و از عمده مزایای این الیاف، می‌توان به جلوگیری از این خرابی اشاره کرد. سازوکار این الیاف در ممانعت از توسعه این خرابی، ذوب شدن این الیاف در هنگام مواجهه با حرارت‌های بالا بوده که سبب می‌شود کانالی برای خروج بخار آب از داخل حجم بتن فراهم شود [33]. نمونه‌های بتنی تقریباً از آب اشباع هستند که میزان این آب اشباع به نسبت آب به سیمان نمونه‌ها بستگی دارد. زمانی که سطح بتن در معرض حرارت بالا قرار می‌گیرد، قسمتی از آب آزاد تبخیر شده و به سمت فضای خارج حرکت می‌کند. به دلیل اختلاف دمایی، قسمت میانی بتن خنک‌تر بوده و بخار به آب تبدیل می‌شود. با افزایش بخار و ادامه فرآیند میعان، ناحیه‌ای با آب بیشتر در قسمت خارجی نمونه‌های بتنی تشکیل می‌شود. این لایه مانع از تشکیل بیشتر ناحیه با آب اشباع شده ولی سعی در خروج از فضای داخلی نمونه بتنی دارد. اگر ساختار بتن به اندازه کافی متراکم باشد یا نرخ حرارت دهی بسیار بالا باشد، خروج آب از منافذ نمونه بتنی به سادگی میسر نشده و فشار بخار در داخل نمونه افزایش می‌یابد. در صورت افزایش این فشار از تنش کششی نمونه بتنی، قلوه کن شدن رخ خواهد داد.



شکل 9: تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترلی در نمونه‌های مختلف.

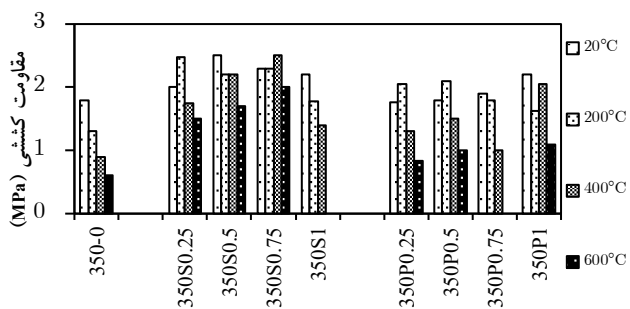
به دلیل تخریب انفجاری نمونه کنترلی با عیار 350، امکان مقایسه سایر نمونه‌ها با این نمونه وجود ندارد. نمونه بتنی با عیار 400 و حاوی الیاف فولادی، افزایش مقاومتی به طور متوسط به میزان 27 درصد برای سن 7 روزه و 6/3 درصد برای سن 28 روزه نسبت به

نمونه کنترلی از خود نشان داد. این افزایش برای نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن به ترتیب 24/2 و 9/9 درصد بود. افزایش عیار سیمان به 450 منجر به تخریب برخی دیگر از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی شد. درحالی که افزودن الیاف پلی پروپیلن به این نمونه‌ها سبب شد مقاومت فشاری به طور متوسط برای مقادیر مختلف الیاف به میزان 3/5 درصد افزایش یابد. در شکل 9 تغییرات صورت گرفته در مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف نسبت به نمونه کنترلی آورده شده است.

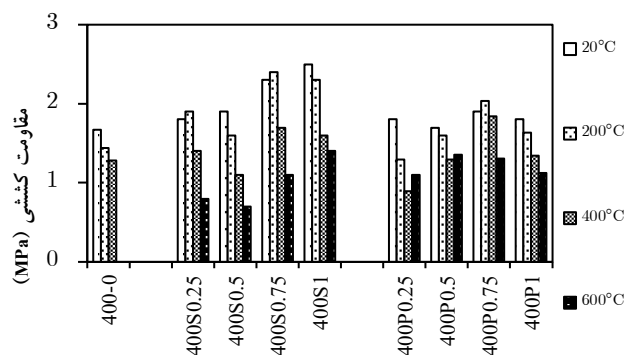
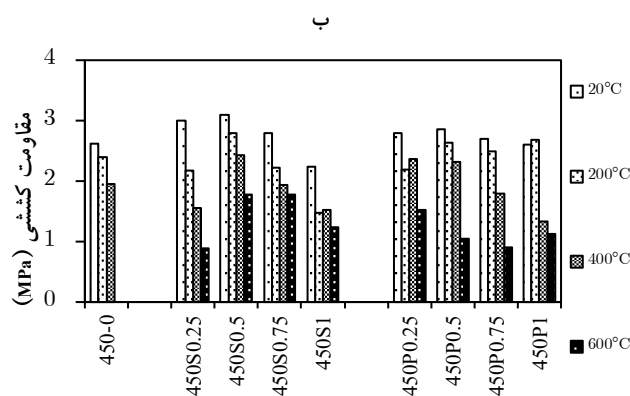
3-3- مقاومت کششی نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر عیار سیمان، نوع الیاف، میزان استفاده از الیاف و حرارت‌های مختلف بر مقاومت کششی نمونه‌های بتنی، آزمایش کشش دو نیم شدگی انجام شد. در شکل 10 نحوه انجام مقاومت کششی به همراه نتایج مقاومت‌های کششی نمونه‌های با عیارهای مختلف سیمان آورده شده است. بعلاوه، جزئیات نتایج به دست آمده از این آزمایش در جدول 5 آورده شده است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، افزایش حرارت در اغلب حالات موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها خواهد شد. این افزایش حرارت در نمونه‌های فاقد الیاف به دلیل تغییرات شیمیایی ایجاد شده در بتن می‌باشد. بتن مصالحی ناهمگن شامل خمیر سیمان، سنگدانه‌ها و گاهی میلگردهای فولادی و یا الیاف بعنوان عنصر مقاوم کننده می‌باشد. اطلاع از پاسخ هر یک از این اجزا در برابر حرارت‌های بالا به تنهایی کاری دشوار بوده و زمانی که بعنوان یک عضو سازه در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، دشوارتر نیز خواهد شد. بر اساس تحقیقات Mindess و همکاران [34] خمیر سیمان شامل مولفه‌های شیمیایی متعددی می‌باشد که به همین دلیل در اثر حرارت، پاسخ متفاوتی از خود نشان می‌دهد. یکی از مهمترین مولفه‌های موجود در خمیر سیمان، سیلیکات کلسیم هیدراته شده (به اختصار C-S-H) می‌باشد که حدود 50 تا 60 درصد حجم خمیر سیمان را تشکیل می‌دهد. بعلاوه کلسیم هیدروکسید (یا به اختصار CH) به طور معمول 20 تا 25٪ حجم خمیر سیمان را به خود اختصاص می‌دهد. در نهایت نیز آب بعنوان عنصر باقیمانده تشکیل دهنده خمیر سیمان و بعنوان عاملی مهم در زوال مقاومت در دماهای بالا معرفی می‌شود. آب اضافه شده به خمیرسیمان در منافذ بتن قرار می‌گیرند؛ به طور کلی دو نوع حفره در بتن وجود دارد، حفرات موئینه و حفرات موجود در ژل سیمان. اندازه حفرات موئینه بین 10 تا 1000 نانومتر در نوسان است و اندازه حفرات موجود در ژل سیمان نیز کمتر یا مساوی 10 نانومتر می‌باشد. آب موجود در این حفرات با یکدیگر تفاوت دارند، آب موجود در منافذ موئینه بعنوان آب قابل تبخیر شناخته می‌شود درحالی که آب موجود در حفرات ژل بعنوان قسمتی از C-S-H تعریف می‌گردد. به علت پیچیدگی مصالح تشکیل دهنده بتن، تعیین درجه حرارت دقیقی که در آن بتن شروع به تغییر رفتار کند، قابل بیان نیست. با این وجود، پاسخ کلی بتن در اثر حرارت‌های بالا توسط محققین مختلفی مانند Fletcher و همکاران [35] و Hertz [36] ارائه شده است.



الف



د

ج

شکل 10: الف) نحوه انجام آزمایش مقاومت کششی، ب) مقاومت کششی نمونه‌های با عیار 350 تحت حرارت‌های مختلف، ج) مقاومت کششی نمونه‌های با عیار 400 تحت حرارت‌های مختلف، د) مقاومت کششی نمونه‌های با عیار 450 تحت حرارت‌های مختلف.



جدول 5: نتایج مقاومت کششی (تمامی واحدها بر حسب MPa هستند).

دما (سانتیگراد)	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C
نام نمونه				
350-0	1/8	1/3	0/9	0/6
350S0.25	2	2/7	1/74	1/5
350S0.5	2/5	2/2	2/2	1/7
350S0.75	2/3	2/3	2/5	2
350S1	2/2	1/77	1/4	--
350P0.25	1/76	2/05	1/3	0/83
350P0.5	1/8	2/1	1/5	1
350P0.75	1/9	1/8	1	--
350P1	2/2	1/63	2/05	1/1
400-0	1/67	1/44	1/28	--
400S0.25	1/8	1/9	1/4	0/8
400S0.5	1/9	1/6	1/1	0/7
400S0.75	2/3	2/4	1/7	1/1
400S1	2/5	2/3	1/6	1/4
400P0.25	1/8	1/3	0/9	1/1
400P0.5	1/7	1/6	1/3	1/35
400P0.75	1/9	2/04	1/84	1/31
400P1	1/8	1/64	1/34	1/12
450-0	2/62	2/39	1/95	--
450S0.25	3	2/17	1/56	0/89
450S0.5	3/1	2/8	2/43	1/78
450S0.75	2/8	2/23	1/94	1/78
450S1	2/24	1/48	1/52	1/23
450P0.25	2/8	2/19	2/37	1/53
450P0.5	2/85	2/64	2/31	1/05
450P0.75	2/7	2/5	1/8	0/9
450P1	2/6	2/69	1/33	1/13

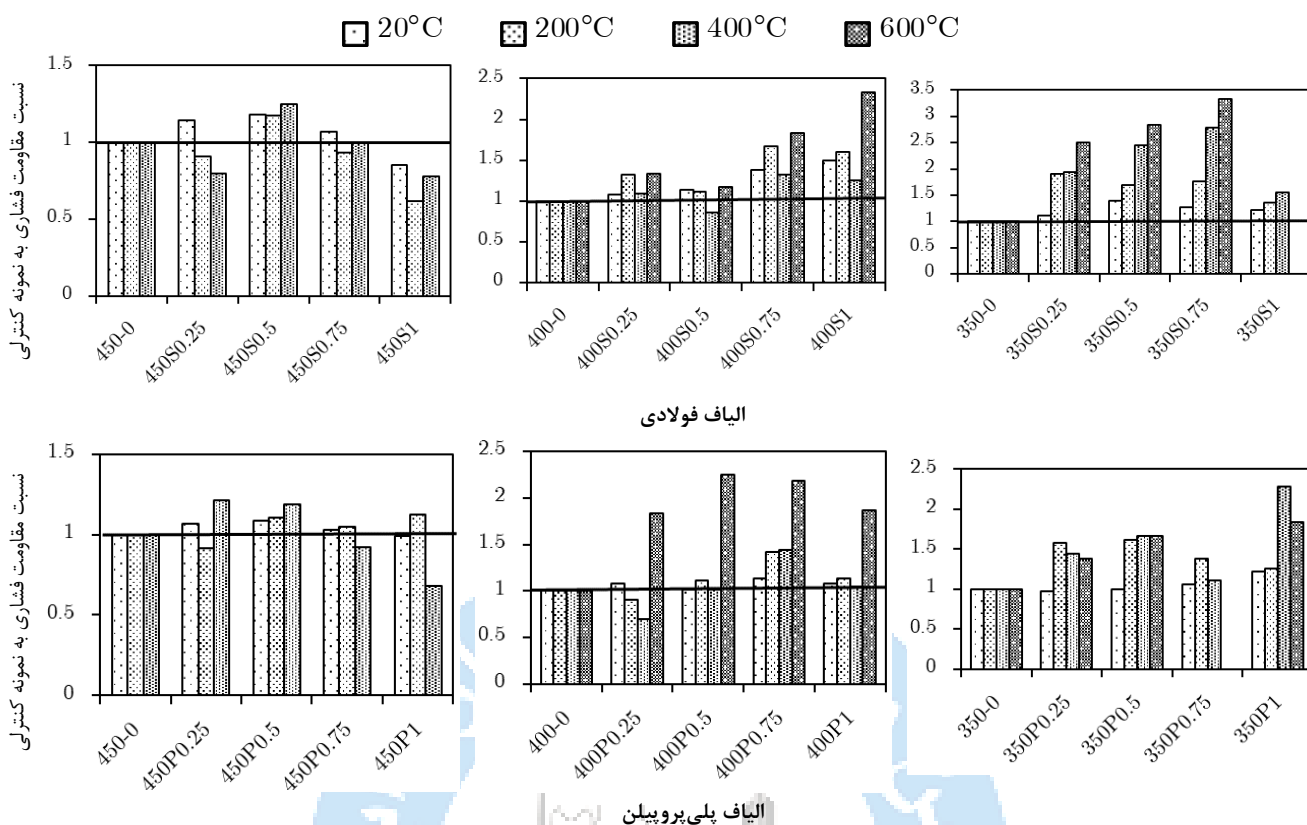
زمانی که بتن به دمای 100 تا 140 درجه می‌رسد، آب موجود در بتن شروع به تبخیر کرده و منجر به افزایش فشار در بتن می‌شود. زمانی که دما به 150 درجه می‌رسد، آب موجود در C-S-H تبخیر شده و در نتیجه خمیر سیمان دی هیدراته شده و کاهش حجم می‌دهد. در نتیجه این عمل تنش‌های داخلی افزایش می‌یابد. در دماهای بالای 300 درجه این تنش‌های داخلی موجب ایجاد ترک‌های ریز و در نتیجه ایجاد تغییرشکل‌های غیرقابل برگشت می‌نمایند. در دمای 400 تا 600 درجه سانتیگراد، CH موجود در خمیر سیمان تجزیه شده و کلسیم اکسید و بخار آب تولید می‌شود. این تجزیه منجر به کاهش مقاومت بتن به طرز چشمگیری می‌شود. در دمای 575 تا 800 درجه سانتیگراد، کاهش مقاومت بعلت تغییرات شیمیایی سنگدانه‌ها آغاز می‌شود. سنگدانه‌های بر پایه کوارتز در دمای 575 افزایش حجم داده و سنگدانه‌های آهکی در دمای 800 درجه تجزیه می‌شوند که در این دماها بتن تبدیل به توده‌ای سنگدانه خواهد شد. به همین دلیل نیز در استاندارد یوروکد برای بتن در دماهای بالا 600 درجه مقاومتی لحاظ نشده و از نظر تئوری بتن در این دما فاقد مقاومت باربری می‌باشد.

میزان کاهش مقاومت در نمونه‌های فاقد الیاف، در عیار 350، 400 و 450 به ترتیب 48/3، 18/6، و 17/2٪ کاهش به طور میانگین برای حرارت‌های مختلف می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کاهش مقاومت کششی نمونه‌های بتنی فاقد الیاف در گروه‌های با میزان سیمان بیشتر، نمود کمتری دارد. دلیل این امر را می‌توان به میزان بیشتر سیمان و پیشرفت بیشتر و بهتر فرآیند هیدراتاسیون نسبت داد که سبب می‌شود خمیر سیمان یکپارچگی بیشتری داشته باشد. با این حال، مقاومت کششی نمونه‌های فاقد الیاف

بسیار اندک می‌باشد. از طرف دیگر، با افزایش حرارت، مقاومت کششی نمونه‌های بدون الیاف نرخ نزولی داشته که این نرخ برای نمونه‌های با عیار کمتر، بیشتر می‌باشد. در برخی نمونه‌ها مقاومت کششی پس از حرارت دیدن نسبت به نمونه کنترلی افزایش داشتند. این مورد بیشتر در نمونه‌هایی که در معرض حرارت 200 درجه قرار داشتند، نمود داشت. نتایجی مشابه در تحقیقات دیگر دیده شد [7، 10، 36 و 37].

افزایش حرارت سبب می‌شود مقاومت کششی کاهش یابد. با این حال، وجود الیاف در نمونه‌های بتنی سبب می‌شود مقاومت کششی افزایش یابد. این افزایش برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و عیار 350 در دمای 200 درجه به طور متوسط 68٪ می‌باشد. با افزایش میزان الیاف مصرفی در نمونه بتنی، میزان افزایش مقاومت کششی کاهش می‌یابد. تأثیر مثبت الیاف فولادی در دمای 400 درجه و عیار 350 به میزان 117٪ بوده که این مقدار برای دمای 600 درجه به 188٪ افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد برای بتن‌های با عیار کمتر، استفاده از الیاف فولادی برای بهبود مقاومت کششی مؤثرتر می‌باشد. روندی مشابه برای الیاف پلی‌پروپیلن نیز مشاهده شد. مقادیر بهبود مقاومت کششی برای دمای 200، 400، و 600 درجه سانتیگراد به ترتیب 45/7، 62/5 و 62/7 درصد می‌باشد. با افزایش عیار سیمان به 400 کیلوگرم در هر مترمکعب، میزان کارایی الیاف فولادی در دماهای مختلف به ترتیب 42/3، 13/2 و 66/6 درصد می‌باشد که این مقادیر برای الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب برابر با 22/2، 16/6 و 110٪ بود. عیار سیمان بالاتر موجب تضعیف عملکرد الیاف فولادی در دماهای بالا می‌شود به نحوی که اضافه کردن الیاف در دمای 200 و 400 موجب کاهش 10 و 4/5 درصدی مقاومت کششی به طور میانگین می‌شود. با این حال، الیاف پلی‌پروپیلن در این دو دما به ترتیب باعث 4/8 و 0/1٪ افزایش شد که نشان از عملکرد مثبت الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف فولادی در دماهای بالا و عیار سیمان بیشتر حکایت دارد. تغییراتی که بتن در معرض حرارت‌های بالا تحمل می‌کند، در ابعاد میکرو بوده که هر دو بخش بتن و الیاف فولادی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به علت تفاوت‌های موجود در ترکیبات شیمیایی بتن و فولاد، تفاوت‌هایی در خصوصیات حرارتی کل مجموعه به وجود می‌آید. بنابراین، تنش‌های داخلی ایجاد شده و منجر به ایجاد ترک و از بین رفتن چسبندگی بین بتن و فولاد می‌شود. این بدین معنی است که خصوصیات مصالح بتن و فولاد در اثر حرارت کاهش می‌یابد [38]. عیار سیمان بالاتر به دلیل ایجاد محیط متراکم موجب می‌شود بخار آب امکان خروج نداشته باشد و این امر سبب قله‌کن شدن بتن و یا ایجاد ترک در نمونه‌ها شود.

تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های مختلف در شکل 11 آورده شده است. نمونه‌هایی که نسبت مقاومتی بیشتر از 1 دارند به منزله افزایش مقاومت نسبت به نمونه کنترلی هستند. در اغلب نمونه‌ها، وجود الیاف سبب بهبود رفتار نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه فاقد الیاف شده است و این امر در زمان مواجهه با حرارت‌های بالا نمود بیشتری دارد.



شکل 11: تغییرات مقاومت کششی نسبت به نمونه کنترلی برای نمونه‌های مختلف.

4- نتیجه گیری

آتش‌سوزی همواره یکی از خطرات بالقوه در سازه‌ها به شمار می‌رود. یکی از راه‌های تقویت سازه‌های بتنی در برابر آتش‌سوزی و به‌خصوص خطر قلوه‌کن شدن مصالح پس از اعمال حرارت‌های بالا، استفاده از الیاف می‌باشد. با این حال، ارزیابی تأثیر وجود الیاف در بتن مستلزم اطلاع از عوامل مختلفی می‌باشد که گاهی بررسی آنها امکان‌پذیر نیست. در تحقیق حاضر، سعی شد عوامل مهم و تأثیرگذار بر رفتار بتن الیافی تحت اثر آتش‌سوزی مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گیرد تا تأثیر هم‌زمان این عوامل بررسی شود. عواملی مانند نسبت آب به سیمان، نوع الیاف، میزان به کارگیری الیاف، سن نمونه‌های بتنی و حرارت‌های مختلف در نظر گرفته شد. آزمایش‌هایی مانند اسلامپ، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه و مقاومت کششی بر روی نمونه‌های بتن تازه و سخت‌شده صورت گرفت. در ادامه اهم نتایج آورده شده است.

1- با افزودن الیاف به بتن، صرف‌نظر از نوع بتن و عیار آن، میزان روانی بتن کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از الیاف فلزی در نمونه‌های با عیار سیمان $350 \frac{kg}{m^3}$ در سن 7 و 28 روزه و در دمای محیط منجر به افزایش حدود 10 درصدی می‌شود. با این حال، روندی کاملاً متضاد برای نمونه‌های بتنی الیافی ساخته شده با الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده شد به‌نحوی که استفاده از این الیاف منجر به کاهش مقاومت فشاری 7 و 28 روزه به طور متوسط به ترتیب به میزان $13/7$ و $2/6$ شد. از طرفی، بتن حاوی الیاف فلزی با عیار 400 و 450 در سن 7 روزه، به طور میانگین 10 و 17 درصد کاهش و در سن 28 روزه، 6/0 و 8/2 درصد کاهش مقاومت فشاری داشتند.

2- در نمونه‌های حرارت دیده، مشاهده شد که با افزایش عیار سیمان، از میزان اثربخشی الیاف فلزی در بهبود مقاومت فشاری کاسته می‌شود. تأثیر اضافه کردن الیاف در ممانعت از کاهش مقاومت فشاری نیز قابل توجه بود به‌نحوی که افزودن مقادیر مختلف الیاف فولادی به نمونه‌های با عیار 350، 400 و 450 در سن 7 روزه به ترتیب منجر به افزایش $21/1$ ، $17/7$ و $21/9$ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترلی در هر عیار گردید.

3- روندی مشابه در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده شد. افزودن مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های با عیار 350، 400 و 450 در سن 7 روزه به ترتیب منجر به افزایش 2/2، 38/8 و 27/8 درصد بود که نشان از عملکرد بهتر این الیاف در برابر حرارت‌های بالا در قیاس با الیاف فولادی دارد.

4- با افزایش سن، میزان افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و عیارهای 350، 400 و 450 به ترتیب و به طور متوسط برابر 19/2، 15/3 و 9/5 درصد بود. عملکرد الیاف پلی‌پروپیلن نیز برای عیارهای مختلف به ترتیب، 8، 22 و 8/5 درصد افزایش از خود نشان داد.

5- با افزایش حرارت به 600 درجه سانتیگراد، برخی از نمونه‌های بتنی قلوه کن شده و با حالتی انفجاری در هنگام خروج از کوره، تخریب شدند. خرابی از نوع قلوه کن شدن در نمونه‌های با الیاف پلی‌پروپیلن رخ نداده و از عمده مزایای این الیاف، می‌توان به جلوگیری از این خرابی اشاره کرد.

6- افزایش حرارت سبب می‌شود مقاومت کششی کاهش یابد. با این حال، وجود الیاف در نمونه‌های بتنی سبب می‌شود مقاومت کششی نسبت به نمونه کنترلی افزایش یابد. این افزایش برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و عیار 350 در دمای 200 درجه به طور متوسط 68/2 درصد می‌باشد. با افزایش میزان الیاف مصرفی در نمونه بتنی، میزان افزایش مقاومت کششی کاهش می‌یابد. با افزایش عیار سیمان به $400 \frac{kg}{m^3}$ ، میزان کارایی الیاف فولادی در دماهای مختلف به ترتیب 42/3، 13/2 و 66/6 درصد می‌باشد که این مقادیر برای الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب برابر با 22/2، 16/6 و 110 درصد بود.

5- توصیه‌هایی برای تحقیقات آتی

اطلاع از اثربخشی عوامل مختلف بر پاسخ بتن البافی در معرض دماهای بالا برای درک کامل تأثیر هر پارامتر و اهمیت آن ضروری است. ارزیابی تحقیقات صورت گرفته قبلی نشان داده است که در نسبت‌های کم آب به سیمان، یعنی کمتر از 0/4، شکاف تحقیقاتی وجود داشته و نیاز است که این معضل با نتایج آزمایشگاهی معتبر پوشش داده شود. بعلاوه، حرارت‌های بالاتر از 800 درجه نیز می‌تواند یکی از جنبه‌هایی باشد که در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد. اهمیت این درجه حرارت آنجا مشخص می‌شود که درجه حرارت‌های بالا، مانند 800 درجه سانتیگراد، ناحیه‌ای حساس برای قلوه‌کن شدن بتن می‌باشد.

مراجع

- [1] Williamson, G. R. (1974). The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete. *Special Publication, 44*, 195-208. <https://doi.org/10.14359/17894>
- [2] Fattuhi N.I., Hughes B.P. (1989). Reinforced steel fiber concrete corbels with various shear span-to-depth ratios, *ACI Struct J.*; 86-M57: 590-6p. <https://doi.org/10.14359/2243>
- [3] Rashidian, S., Ziaei, M., & Esmacilabadi, R. (2023). Experimental study of the effect of elevated temperature on compressive and tensile strength of concrete made with microsilica and polypropylene, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(8). <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.343151.2818>
- [4] Izadifard, R. A., & Abdi Moghadam, M. (2021). Evaluation of various content of steel fibers on improving the mechanical and durability properties of concrete at high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), 159-176. <https://doi.org/10.22065/JSCE.2019.166490.1757>
- [5] Dwarakanath, H. and Nagaraj, T. (1991). Comparative Study of Predictions of Flexural Strength of Steel Fiber Concrete, *ACI Materials Journal*, Volume 88, Issue 73, Pp.49-58, 1991. <https://doi.org/10.14359/1262>
- [6] Ikponmwsa, E. and Salau, M. (2011). Effect of Short Steel Fibre Reinforcement on Laterized Concrete Columns, *Journal of Sustainable Development*, Vol. 4, No. 1, pp.230-239. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n1p230>

- [7] Khalily, M., Saberi, V., Saberi, H., Mansouri, V., Sadeghi, A., & Pachideh, G. (2022). An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(12), 284-307. <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.254752.2277>
- [8] Nadi, S., Beheshti Nezhad, H., & Sadeghi, A. (2022). Experimental study on the durability and mechanical properties of concrete with crumb rubber. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00156-9>
- [9] Hou, X., Abid, M., Zheng, W., & Hussain, R. R. (2019). Effects of temperature and stress on creep behavior of PP and hybrid fiber reinforced reactive powder concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0357-9>
- [10] Chan, Y. N., X. Luo, and W. Sun. (2000). Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 C. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 247-251. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00240-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00240-9)
- [11] Chen, B., and Juanyu L. (2004), Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research* 34(6), 1065-1069. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.010>
- [12] Poon, C., Shui, Z. H., and Lam. L. (2004). Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cement and concrete Research* 34(12), 2215-2222. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.011>
- [13] Han, C., Hwang, Y., Yang, S., and Gowripalan, N. (2005). Performance of spalling resistance of high-performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and concrete research* 35(9), 1747-1753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.013>
- [14] Peng, G., Yang, W., Zhao, Y., Bian, S., and Zhao, L. (2006). Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research* 36(4), 723-727. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.014>
- [15] Aydın, S., Yazıcı, H., and Baradan, B. (2008). High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 22, 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.003>
- [16] Kim, Y., Lee, T., and Kim, G.(2013). An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load. *Materials and structures*, 46(4), 607-620. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9918-y>
- [17] Chen, G. M, He, Y., Yang, H., Chen, J. F., and Guo, Y. C. (2014). Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 71, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.012>
- [18] Niu, X. J., Zhao, Q. X., and Nie, Y. (2015). Effect of polypropylene macro-fiber on properties of high-strength concrete at elevated temperatures. In *Key Engineering Materials*, Vol. 629, pp. 284-290. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.284>
- [19] Shaikh, F. U. A., and Hosan, A. (2016). Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concretes at elevated temperatures. *Construction and building materials*, 114, 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.158>
- [20] Choumanidis, D., Badogiannis, E., Nomikos, P., and Sofianos, A. (2016). The effect of different fibres on the flexural behaviour of concrete exposed to normal and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 129, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.089>
- [21] Maluk, C., Bisby, L., and Terrasi, G. P. (2017). Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. *Engineering Structures*, 141, 584-595. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.058>

- [22] Gholhaki, M., Pachideh, G., & Rezayfar, O. (2017). An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(3), 167-179.
- [23] Amancio, F. A., de Carvalho Rafael, M. F., de Oliveira Dias, A. R., and Cabral, A. E. B. (2018). Behavior of concrete reinforced with polypropylene fiber exposed to high temperatures. *Procedia Structural Integrity*, 11, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.013>.
- [24] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2019). An experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(2), 1606-1620.
- [25] Bošnjak, J., Sharma, A., and Grauf, K. (2019). Mechanical properties of concrete with steel and polypropylene fibres at elevated temperatures. *fibers*, 7(2), 9. <https://doi.org/10.3390/fib7020009>
- [26] Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A., and Poorveis, D. (2019). Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.209>
- [27] Papachristoforou, M., Anastasiou, E. K., and Papayianni, I. (2020). Durability of steel fiber reinforced concrete with coarse steel slag aggregates including performance at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 262, 120569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120569>
- [28] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2020). Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173(1), 3-16.
- [29] Khan, M., Cao, M., Chaopeng, X., and Ali, M. (2022). Experimental and analytical study of hybrid fiber reinforced concrete prepared with basalt fiber under high temperature. *Fire and Materials*, 46(1), 205-226. <https://doi.org/10.1002/fam.2968>
- [30] ACI-211, (2016). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, USA, Reported by ACI Committee 211.
- [31] Iranian National Building Code, (2014). *Design and implementation of reinforced concrete buildings*. Tehran, Office of national building regulation affairs.
- [32] Gholhaki, M., Sharbatdar, M., & Pachideh, G. (2022). An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments. *Journal of Building Engineering*, 61, 105275.
- [33] Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., and He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*, 93, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- [34] Mindess, S., Young, J., and Darwin, D. (2003). *Concrete*. Upper Saddle River, Prentice Hall, Pearson Education, Inc.
- [35] Fletcher, I. A., Welch, S., Torero, J. L., Carvel, R. O., and Usmani, A. (2007). Behaviour of concrete structures in fire. *Thermal science*, 11(2), 37-52. <https://doi.org/10.2298/TSCI0702037F>
- [36] Hertz, K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Magazine of concrete research*, 57(8), 445-453. <https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.8.445>
- [37] Pliya, P., Beaucour, A. L., and Noumowé, A. (2011). Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Construction and building materials*, 25(4), 1926-1934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.064>
- [38] Aslani, F., and Kelin, J. (2018). Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 200, 1009-1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.323>