

Investigating the effect of ambient temperature on the mechanical characteristics of high-strength concrete containing steel fibers and polypropylene under wet and dry cycles and water containing magnesium sulfate

Masoud Dehkhoda Rajabi¹, Ramezanali Izadifard^{*2}

1- Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Azad University, Qazvin, Iran

2- Associate Professor, Department of Technical and Engineering, Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Harmful environmental conditions in the Persian Gulf, such as temperature and sulfates, cause extensive damage to concrete structures. One of the factors that greatly affect the destruction of these structures is the amount of harmful factors in the water and the number of times these structures are exposed to water and ambient heat. Therefore, the present study has attempted to do this study, considering the lack of a study that has clearly examined the mechanical characteristics of fiber reinforced concrete under the mentioned conditions. In this research, high-strength concrete without fibers and high-strength concrete with PP, ST fibers and PP-ST hybrid fibers were used. Destructive environmental conditions of this study are simulated wet and dry cycles in 60, 120, 180, 240 and 360 cycles at ambient temperature and at 40 degrees Celsius under blowing heat to the samples and compressive, tensile and shrinkage tests have been used. Among the results of this study, there is a faster growth of the initial compressive and tensile strength in conditions at 40 degrees Celsius, which is because the dry process is faster, so that it affects the moisture transfer of concrete, and the wetting process that occurs after that, accelerates the ions and solutions into the concrete and deepens the depth of penetration and accelerates the production of ettringite. In the strength drop stage, HS-ST-PP, HS-ST and HS-PP concretes show the lowest compressive strength drop, respectively. While at a temperature of 40 degrees Celsius, HS-PP concrete shows a better behaviour than HS-ST concrete, which is due to a lot of rusting and corrosion of steel fibers in these condition.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 November 2024

Revise Date: 17 January 2025

Accept Date: 17 February 2025

Keywords:

High strength concrete
fiber concrete
wet and dry cycle
cold and hot cycle
magnesium sulfate

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.481471.3535

*Corresponding author: Ramezanali Izadifard.

Email address: lzadifard@eng.ikiu.ac.ir

بررسی اثر حرارت محیط بر مشخصات مکانیکی بتن پر مقاومت حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت سیکل های تر و خشک و آب حاوی سولفات منیزیم

مسعود دهخدا رجبی^۱، رمضانعلی ایزدی فرد^{۲*}

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

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام خمینی، قزوین، ایران

چکیده

شرایط محیطی مخرب در نواحی خلیج فارس همچون دما و سولفات ها برای سازه های بتنی آسیب های گسترده ایجاد می نماید. یکی از عواملی که به شدت بر میزان تخریب این سازه ها تأثیر می گذارد میزان عوامل زیان آور موجود در آب و تعداد دفعات قرارگیری این سازه ها در معرض آب و گرمای محیط هست. لذا مطالعه حاضر با توجه به عدم وجود مطالعه ای که به روشنی به بررسی مشخصات مکانیکی بتن پر مقاومت الیافی پرداخته باشد اقدام به انجام این بررسی کرده است. در شرایط مذکور این نوع بتن به دلیل دوام و استحکام مناسب المانهای سازه ای در تعمیر و ترمیم بتن های آسیب دیده کاربردی می باشند. در این پژوهش از بتن پر مقاومت بدون الیاف و بتن پر مقاومت با الیاف ST,PP و الیاف هیبرید PP-ST استفاده شده است. شرایط محیطی مخرب این مطالعه سیکل های تر و خشک در سیکل های ۲۴۰، ۱۸۰، ۱۲۰، ۶۰ و ۳۶۰ در دمای محیط و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد تحت حرارت دمنده به نمونه ها شبیه سازی شده است واز تست های فشاری، کششی و جمع شدگی استفاده شده است. از جمله نتایج این مطالعه، رشد سریع تر افزایش مقاومت فشاری و کششی اولیه در شرایط قرارگرفته در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد است که دلیل آن سریع تر بودن پروسه ی خشک شدن است به طوری که روی انتقال رطوبت بتن اثر گذاشته و در پروسه ترشدن که به دنبال آن رخ می دهد، انتقال محلول ها و یون ها به داخل بتن را تسریع و عمق نفوذ را عمیق تر می کند و تولیدات اترینگایت را تسریع می بخشد. همچنین نشان داده شده که در محیط ۴۰ درجه بتن HS-ST دارای بیشترین افت مقاومت فشاری و کششی بوده است، به طوری که در مورد مقاومت فشاری در سیکل های ۲۴۰ و ۳۶۰ به ترتیب ۱۷/۶۴ و ۲۹/۲۷ درصد افت را تجربه کرده است. در مورد مقاومت کششی، نمونه های بتنی با الیاف هیبرید علیرغم افت کم در دمای محیط، در دمای ۴۰ درجه دچار افت ۱۳/۹۵- درصد شده است. دلیل آن خوردگی، زنگ زدگی و کاهش مقاومت کششی الیاف فولادی در شرایط مذکور است.

کلمات کلیدی: بتن پر مقاومت، بتن الیافی، سیکل تر و خشک، سیکل سرد و گرم، سولفات منیزیم.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۳/۰۸/۲۴	۱۴۰۳/۱۰/۲۸	۱۴۰۳/۱۱/۲۹	۱۴۰۳/۱۱/۲۹	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	10.22065/jsce.2025.481471.3535
*نویسنده مسئول:		رمضانعلی ایزدی فرد			
پست الکترونیکی:		Izadifard@eng.ikiu.ac.ir			

۱ - مقدمه

افت خواص و کاهش دوام بتن تحت حملات سولفات از موضوعات حائز اهمیت است. در مقایسه باحالتی که بتن در محلول‌های سولفات همیشه غوطه‌ور است، آسیب‌های وارد شده در محیط‌های خشک و تر پیچیده‌تر می‌باشد [۱-۲]. در واقع سیکل خشک و تر عاملی است که روی حمله سولفات‌های بتن اثرگذاری مضاعف دارد [۳-۴]. سازه‌های ساحلی به دلیل نوسانات مکرر سطح آب دریا در معرض سیکل‌تر و خشک با پروسه‌ای تکراری و ادامه‌دار موجب نفوذ یون‌های مخرب در خلال پروسه تر شدن به ماتریکس می‌شود و در پروسه خشک شدن ترک‌هایی تولید می‌شود [۵]. بیشترین نمک‌های متداول که به بتن آسیب وارد می‌کند شامل سولفات کلسیم (Ca_2SO_4)، سولفات سدیم (Na_2SO_4)، سولفات پتاسیم (K_2SO_4) و سولفات منیزیم ($MgSO_4$) است [۶]. در این میان، یون منیزیم در آب دریا با هیدروکسید کلسیم در بتن واکنش داده و به‌عنوان بروسیت^۱ رسوب می‌کند [۷] که میزان قلیایی بودن محلول را کم کرده و نهایتاً موجب بی‌ثباتی $C-S-H$ و تخریب بتن می‌شود [۸]. تمرکز یون‌های منیزیم در آب دریا نسبتاً پایین است، اما اثر کلسیم زدایی^۲ با اثرات توأم ناشی از فاکتور محیط‌های دریایی مانند در معرض دمای بالای محیط قرار گرفتن و سیکل خشک و تر تشدید می‌شود [۹].

در پژوهشی نشان داده شده است که مقاومت بتن معمولی پس از خوردگی سولفات تحت سیکل‌های خشک و تر، ابتدا یک دوره افزایش تا ۶۰ روز داشته و به دنبال آن یک روند کاهشی را نشان می‌دهد [۱۰]. در مطالعه‌ای دیگر از بتن با مقاومت فشاری حدود ۵۵ مگا پاسکال مسلح شده با الیاف PVA برای تعمیر بتن قدیمی استفاده کرده است. در این مطالعه با اعمال شرایط ویژه سیکل‌های سرد و گرم و سیکل خشک و تر، نتیجه گرفته شده است که اثر توأم سیکل‌های خشک و تر و گرم و سرد، اثر تخریبی شدیدتری در فصل مشترک ملات قدیم و جدید دارد [۱۱]. در مطالعه‌ای دیگر اثر نسبت‌های مختلف سیکل‌های خشک و تر در محلول سولفات منیزیم مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج نشان داده‌اند که خواص مکانیکی بتن تحت سیکل خشک و تر پس از یک افزایش اولیه تمایل به کاهش دارد به طوری که در ۶۰ روز اول، خواص مکانیکی بتن سریع‌تر افزایش می‌یابد و در مراحل میانی و انتهایی اثر ترکیبی تنش انبساط^۳، فشار کریستاله شدن نمک و کشش سطحی ناشی از جذب آب مویینه موجب کاهش خواص مکانیکی بتن به صورت عمده‌ای می‌گردد [۳] [۱۲]. با پیشرفت‌های شکل گرفته در فناوری ساخت بتن، بتن‌های پر مقاومت HSC ^۴ در امور اجرایی سازه بسیار محبوب شده است، به طوری که به دلیل کارایی، مقاومت و دوام بالاتر و نفوذپذیری کمتر در مقایسه با بتن معمولی [۱۳-۱۴]، در سازه‌های پیچیده‌تر، سازه‌های بلندمرتبه و پل‌های با دهانه‌های بلند مورد استفاده بسیاری قرار می‌گیرند [۱۵]. در این میان، بتن پر مقاومت (HSC) به علت جمع شدگی^۵ های ناشی از نسبت آب به سیمان پایین تحت آسیب بیشتری قرار دارد. ترک خوردگی ممکن است زمانی که تنش کششی پسماند^۵ بیشتر از مقاومت کششی شود اتفاق افتد [۱۶]، از طرف دیگر بتن HSC به دلیل مقدار بالای سیمان دارای رهایی حرارتی بالایی است که باعث یک واکنش هیدراتاسیون گرمازا^۶ می‌شود، این واکنش منجر به افزایش گرادیان دما بین داخل و خارج بتن شده و جمع شدگی در سنین اولیه و خزش طولانی مدت را باعث می‌شود [۱۷].

اضافه کردن الیاف به بتن می‌تواند ویژگی‌هایی همچون دوام پایین، جمع شدگی و مقاومت در برابر ضربه را برطرف کند [۱۸-۱۹]. علاوه بر آن مقاومت قابل توجه در مقابل شکل‌گیری و رشد ترک در بتن مسلح شده به وجود می‌آید [۲۰]، همچنین، الیاف کرنش در تنش اوج و ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد و اثرات منفی مواد ترد را از طریق بهبود رفتار پس از نقطه اوج^۷ کاهش می‌دهد [۲۱] [۱۹]. در میان الیاف مختلف، الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل هزینه و وزن پایین، مقاومت آن در برابر خوردگی و اسیدها، حرارت، چقرمگی عالی و مقاومت در

¹ Brucite

² Decalcification

³ Expansion

⁴ High-Strength Concrete

⁵ Residual

⁶ Hydration exothermic

⁷ Post-peak

برابر جمع شدگی مورد توجه بسیاری از محققین می‌باشد [۱۹]، [۲۲-۲۵]. از طرفی، به‌طور معمول بتن‌های مسلح شده با یک نوع الیاف موجب بهبود برخی خواص بتن در یک محدوده مشخص می‌شود. در مقابل بتن‌های مسلح شده با دو یا چند نوع الیاف ممکن است یک گزینه‌ی بهتری برای بهبود خواص باشد. از آنجایی که ترک در بتن در اندازه‌ها و موقعیت‌های نیرویی مختلف است، بکارگیری انواع مختلف الیاف با طول‌های مختلف یک‌راه مناسب به‌منظور جلوگیری از گسترش ترک‌های میکرو و ماکرو است [۱۹]. در میان ترکیبات مختلف انواع الیاف کوتاه در بتن معمولی، ترکیب الیاف *ST* و *PP* به‌عنوان یکی از روش‌های موثر در بهبود خواص کلی ترکیب مخصوصاً مقاومت و شکل‌پذیری معرفی شده است [۲۶]. بتن دارای پروسه شکست در مقیاس‌های میکرو و ماکرو است. الیاف استیل به دلیل مدول الاستیسیته بالای آن و اینکه یک نوع الیاف ماکرو می‌باشند می‌توانند ترک‌های ماکرو را متصل و مانع رشد بیشتر آن‌ها در مقیاس بزرگ شوند، اگرچه برای میکرو ترک‌هایی که در سنین اولیه اتفاق می‌افتد، اثر بازدارندگی الیاف فولادی محدود است [۲۷]. به‌منظور کاهش اثر ترک‌های اولیه انواع مختلف الیاف با مدول الاستیسیته پایین همچون الیاف *PP* به بتن اضافه می‌شود [۲۸]. ترکیب الیاف *PP* و *ST* در بتن می‌تواند مزایای هر دو نوع الیاف را داشته باشد که به طرز مؤثری موجب محدود کردن بروز و رشد ترک‌های بتن می‌شود [۲۹].

از جمله مطالعات صورت گرفته پژوهش وانگ و همکاران است که نشان داده، الیاف *PP* می‌تواند موجب افزایش بسیار کم مقاومت فشاری در بتن *HPC* شود ولی مقاومت کششی جداشدگی را به‌صورت عمده‌ای افزایش دهد [۳۰]. در مطالعه‌ای با اندازه‌گیری فشار منافذ بتن *HSC* حرارت دیده‌شده نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف *PP* در کاهش پدیده پوسته‌پوسته شدن^۸ بسیار مؤثر است [۳۱]. همچنین در مورد الیاف فولادی نشان داده‌شده است که الیاف استیل به‌طور مؤثری مقاومت فشاری تک‌محوری و چند محوری بتن *HSC* را بهبود می‌بخشد و مد شکست را از شکست ترد به شکست شکل‌پذیر مخصوصاً در شکست فشاری چند محوری تغییر می‌دهد [۱۷] [۳۲]. در مطالعه‌ای دیگر نشان داده‌شده است که اعمال ۲٪ الیاف فولادی دندان‌دندان^۹ به بتن منجر به کاهش ۲۴٪ جمع شدگی در بتن *HPC* شده است [۳۳]. گزارشی به اثر الیاف فولادی دو سرهوک در کاهش جمع شدگی در بتن پر مقاومت اشاره کرده است [۱۶]. در رابطه با استفاده توأم از الیاف *PP* و *ST* در بتن *UHPC* به‌منظور ارزیابی اثر این دو نوع الیاف روی ترشوندگی سطح سولفات^{۱۰}، سیکل ذوب و یخ و مقاومت خوردگی مشاهده‌شده است که دوام بتن با اضافه کردن الیاف ترکیبی در محیط‌های مذکور بهبود می‌یابد [۳۴]. گزارشی که از الیاف *PP*، *ST* و *PVA* برای مسلح سازی بتن در محیط اسیدی قوی استفاده کرده است نتیجه گرفته است که بتن مسلح شده با الیاف *ST* بیشترین مقاومت در مقابل حرکت مواد مضر را از خود نشان داده است. [۳۵]. پژوهشی دیگر در بررسی خواص دوام و مکانیکی بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف *PP* و *ST* نتیجه گرفت که جایگزینی الیاف فولادی با الیاف *PP* موجب کاهش دوام می‌گردد [۳۶]. در پژوهشی دیگر نشان داده‌شده است که استفاده توأم الیاف *PP* و *ST* در مقایسه با استفاده از یک الیاف در درصد‌های مشابه در بتن *UHPC* باعث افزایش مقاومت در برابر کریستاله شدن نمک و مقاومت در برابر ذوب و یخ می‌شود [۳۷].

بر اساس مطالعات صورت گرفته دریافت شد که پژوهش‌های موجود که به‌صورت جامع و مشخص به بررسی میزان، دوام و عملکرد بتن پر مقاومت *HSC* و همچنین بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف (*FRHSC*)^{۱۱} در محیط‌های خورنده خشک و تر و تأثیر هم‌زمان آن در محیط گرم نپرداخته است. لذا مطالعه‌ی حاضر بر آن دارد که میزان و نحوه‌ی عملکرد بتن *HSC* و *FRHSC* مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن (*PP*) و فولادی (*ST*) و اثر توأم این الیاف را تحت شرایط شبیه سازی شده آب دریای خلیج فارس در اسکله امام خمینی شامل سیکل‌های متوالی خشک و تر به صورت ۶ ساعت جذر و ۶ ساعت مد در آبی حاوی سولفات منیزیم آزمایش شده و در نظر گرفتن شرایطی با دمای هوای جنوب که ۴۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود، از طریق ارزیابی مقاومت فشاری، مقاومت کششی جداشدگی و تست جمع شدگی در مدت زمان ۶ ماه بررسی کند.

⁸ Spalling

⁹ Corrugated

¹⁰ Sulfate Surface Wettability

¹¹ Fiber Reinforced High Strength Concrete

۲- برنامه آزمایشگاهی

این پژوهش که در آزمایشگاه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است شامل ۵ نوع بتن می‌باشد: بتن معمولی، بتن پر مقاومت بدون الیاف (HS)، بتن پر مقاومت با ۰/۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، بتن پر مقاومت با ۱ درصد الیاف فولادی و بتن پر مقاومت با ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به ترتیب با درصدهای ۰/۷ و ۰/۳. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری، مقاومت کششی و جمع شدگی قرار گرفته است. درصد های مذکور برگرفته از مقادیر بهینه مراجع و تست های مکرر نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه بدست آمده است [۳۸]. در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی سیکل‌های متوالی خشک و تر (W/d) مخازن و سیستم گرمایشی ای طراحی شده است که آزمایش‌های فوق برای تمامی نمونه‌ها پس از ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز در دمای معمولی و تحت دمایی حدود ۴۰ درجه انجام گرفته است. مطابق با گزارش‌های آب‌وهوا شناسی اسکله بندر امام خمینی در دریای خلیج فارس در طی هر روز دو بار سیکل تر و خشک تکرار می‌شود. تأثیر قرارگیری نمونه‌های ساخته شده در سیکل‌های تر و خشک در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه مشخص می‌شود. در هر دو شرایط دمای محیط و دمای ۴۰ درجه آب حاوی سولفات منیزیم است. شکل ۱ تصویر مخازن قرار داده شده در شرایطی با دمای محیط و در محفظه ای با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است.



(دمای محیط)

(دمای ۴۰ درجه)

شکل ۱: تعدادی از نمونه‌های ساخته شده در مخازن.

۲-۱ مشخصات مصالح مصرفی

درشت‌دانه مصرفی در ساخت نمونه‌ها از نوع شکسته با حداکثر اندازه سنگدانه به کاررفته ۱۹ میلی‌متر برای بتن معمولی و ۱۲ میلی‌متر برای بتن‌های پر مقاومت است. ریزدانه به کاررفته در ساخت نمونه‌ها از نوع ماسه دو شور است. مطابق با استاندارد $ASTM C33$ حدود بالا و پایین مجاز ارائه شده است [۳۹]. مدول نرمی ریزدانه به کاررفته در این مطالعه ۲.۶ است.

در این مطالعه از سیمان تیپ ۲ معمولی استفاده شده است. الیاف فلزی استفاده شده از نوع دو سر خم با طول ۳۵ میلی‌متر و قطر ۱.۵ میلی‌متر و الیاف PP به طول ۱۲ میلی‌متر و قطر ۰/۰۲۲ میلی‌متر است (شکل ۲). به منظور بررسی میزان تأثیر سیکل‌های تر و خشک

و حرارت روی انواع بتن‌های الیافی استفاده شده، نمونه‌های مورد استفاده با یک طرح اختلاط و با شرایط یکسان آماده و عمل‌آوری شده‌اند. جدول ۱ مشخصات الیاف مورد استفاده در این مطالعه که اطلاعات آن از شرکت سازنده گرفته شده است را نشان می‌دهد. به منظور اختلاط مصالح از آب شرب شهر قزوین استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات الیاف مصرفی [۴۰]

نوع الیاف	درصد به کاررفته (درصد)	طول (میلی‌متر)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
فلزی	۱	۳۵	۱۰۵۰	۷/۸
PP	۰/۳	۱۲	۳۸۰	۰/۹۱



شکل ۲: تصویر الیاف PP و ST مصرفی.

۲-۲ جزئیات طرح اختلاط و تجهیزات

به منظور اختلاط کامل اجزای بتن، شن، ماسه و الیاف به مدت یک دقیقه در مخلوط‌کن مخلوط شدند. در ادامه نصف آب و نصف سیمان و در نهایت تمام مخلوط سیمان با باقیمانده آب به مخلوط‌کن اضافه و مخلوط‌کن به مدت ۳ دقیقه به مخلوط کردن ادامه می‌دهد. پس از اختلاط کامل و تولید یک مخلوط همگن، بتن به داخل قالب ریخته شده و توسط میز لرزان متراکم گردید. اسلامپ نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C1۴۳ [۴۱] برای نمونه‌های HSC-PP, HSC-ST, HSC-N و HSC-PP-ST به ترتیب ۲۵، ۳۰، ۱۹، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر است. پس از ۲۴ ساعت بتن‌ها از قالب‌های مکعبی برای آزمایش فشاری و قالب‌های استوانه‌ای برای آزمایش کششی خارج شدند و به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند. بعد از بیرون آمدن از آب و خشک کردن آب سطحی آن‌ها مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در روز ۲۸ ام تعیین گردید و مابقی نمونه‌ها در مخازن قرار گرفتند تا پس از گذراندن سیکل‌های مورد نظر آزمایش شوند. برای تست‌های جمع شدگی، نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب، مقدار جمع شدگی اولیه آن در روز اول ثبت شده و در طی زمانی که در مخازن مختلف قرار گرفته‌اند مقادیر آنها قرائت می‌گردد. شبیه‌سازی سیکل‌های تر و خشک توسط ۲ مخزن آب، ۲ پمپ و یک تایمر برای فعال‌سازی خودکار پمپ‌ها در زمان مورد نظر به همراه لوله‌کشی مورد نیاز طراحی و ساخته شد. شکل ۳ تجهیزات شبیه‌سازی سیکل‌تر و خشک در شرایط اعمال حرارت به وسیله بخاری دمنده هوای گرم و دمای محیط را نشان می‌دهد. زمان شبیه‌سازی شده برای تکمیل یک سیکل‌تر و خشک طبق گزارش‌های آب و هوایی اسکله امام خمینی در خلیج فارس هر ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. نمونه آب اسکله امام خمینی در آزمایشگاه شیمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه آن طبق گزارش جدول ۳ ارائه شد. به منظور بررسی میزان اثرگذاری یکی از عوامل مخرب آب دریا روی بتن و با بررسی‌های شیمیایی صورت گرفته برای شبیه‌سازی این آب در آزمایشگاه از ۳/۷۸ گرم سولفات منیزیم خشک در هر لیتر آب مخزن استفاده شد. با توجه به بررسی‌های سولفات منیزیم پس از یک ماه

مشاهده شد که آب مخزن پس از این مدت خواص اولیه خود را از دست داده که یکی از دلایل آن جذب سولفات منیزیم توسط نمونه‌های می‌باشد. جدول ۴ نتایج آزمایش بر روی آب حاوی سولفات منیزیم پس از ۱ ماه را نشان می‌دهد؛ بنابراین برای حفظ شرایط واقعی آب خلیج فارس، آب نمونه‌ها پس از یک ماه کاملاً تعویض و سولفات منیزیم مجدد به آب اضافه شد که این روال تا آخر پژوهش انجام گردید. نمونه‌ها پس از سپری کردن سیکل‌های مورد نظر از مخزن خارج شده و در زیر جک فشاری با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلو نیوتون قرار گرفته است.

جدول ۲: طرح اختلاط

نوع بتن	سیمان	آب	شن	ماسه	میکرو سلیس	فوق روان کننده	الیاف %PP	الیاف %ST	نسبت آب به سیمان
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³			
بتن معمولی (N)	۴۴۰	۲۲۵	۹۲۲	۹۲۲					۰/۵۱
پر مقاومت (HSC)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳/۶			۰/۲۴
پر مقاومت با الیاف ST (HSC-ST)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳/۶	۱		۰/۲۴
پر مقاومت با الیاف PP (HSC-PP)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳/۶	۰/۳		۰/۲۴
پر مقاومت با الیاف ST و PP (HSC-PP-ST)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳/۶	۰/۳	۰/۷	۰/۲۴

جدول ۳: مشخصات شیمیایی آب خلیج فارس

* کلر	PH	* سولفات	هدایت الکتریکی	* منیزیم
۲۱۵۶۶ ppm	۷/۲	۳۰۲۰ ppm	۵۵ Ms/cm	۱۶۰۰ ppm

* توضیح: کلر به روش مور^{۱۲}، سولفات به روش گراویستری و منیزیم به روش Atomic Absorption Spectrophotometry سنجیده شده است (A.A.S).

جدول ۴: مشخصات شیمیایی آب شبیه‌سازی شده پس از یک ماه

* سولفات	* منیزیم
----------	----------

12 Mohr

۳۲۰ ppm

۱۶۵۰ ppm



شکل ۳: تجهیزات شبیه‌سازی سیکل تر و خشک در دمای محیط و حرارت.

۲-۳ آزمایش تعیین مشخصات مکانیکی

۲-۳-۱ آزمون مقاومت فشاری

در این مطالعه برای تعیین مقاومت فشاری، بر اساس استاندارد $ACI 318-14$ [۴۲] از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه ۲۸ روزه و باقی نمونه‌ها پس از گذراندن سیکل‌های ۳۶۰، ۲۴۰، ۱۸۰، ۱۲۰، ۶۰ در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش ارائه شده است.

۲-۳-۲ آزمون مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم شدن، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و بر اساس استاندارد $ASTM C 496$ انجام شده است [۴۳]. آزمایش مقاومت کششی ۲۸ روزه و پس از گذراندن سیکل‌های ۳۶۰، ۲۴۰، ۱۸۰، ۱۲۰، ۶۰ در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش ارائه شده است.

۳-۳-۲ تست جمع شدگی¹³

برای به دست آوردن میزان جمع شدگی نمونه‌های بتنی از استانداردهای *ASTM C۲۰۰۸-۱۵۷*, *ASTM C۴۹۰-۲۰۱۱* [۴۴] [۴۵] استفاده شده است. برای هر مخلوط ۳ نمونه آزمایش جمع شدگی به ابعاد ۷۵*۷۵*۲۸۵ میلی‌متر ساخته شده است و میانگین نتایج پس از ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ سیکل تر و خشک ارائه شده است. شکل ۴ نمونه و تجهیزات استفاده شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد.



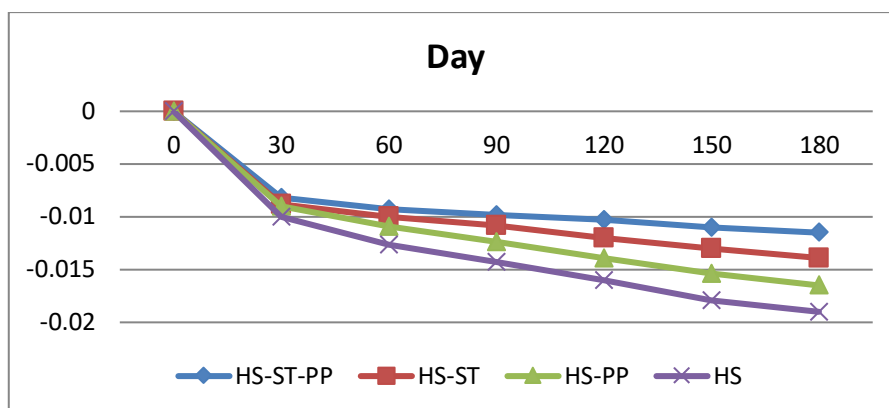
شکل ۴: تصویری از دستگاه جمع شدگی و تعدادی از نمونه‌ها.

۳- بحث و نتایج

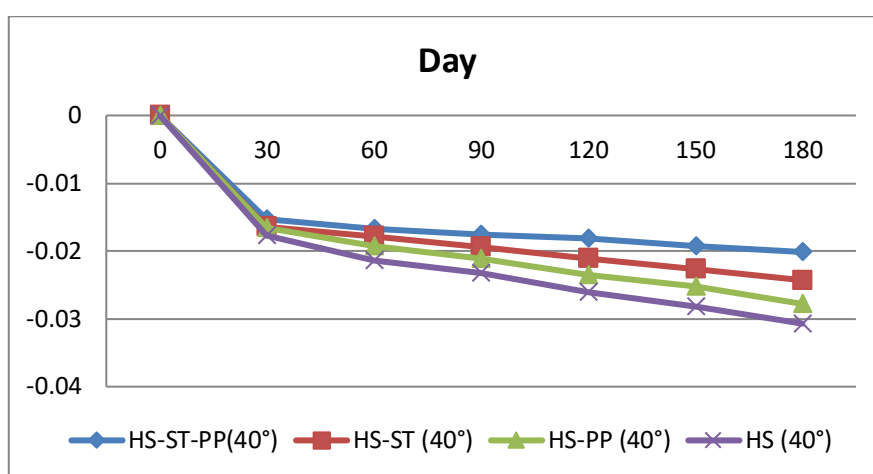
۳-۱ جمع شدگی

روند تغییرات نتایج آزمون جمع شدگی بر روی نمونه‌های تحت مطالعه در دو دمای محیط و ۴۰ درجه در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش میزان جمع شدگی در نمونه‌های قرار داده شده تحت حرارت است.

¹³ Shrinkage



شکل ۵: روند تغییرات نمونه‌های قرار داده شده در دمای محیط.

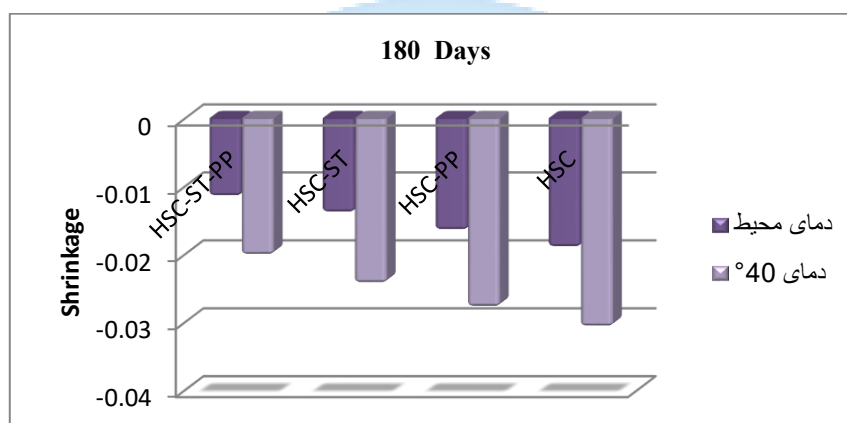


شکل ۶: روند تغییرات نمونه‌های قرار داده شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

بر اساس نتایج هر دو نمودار بالا مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار جمع شدگی در معرض سیکل‌های تر و خشک در تمامی سیکل‌ها در هر دو دمای تحت مطالعه، مربوط به بتن پر مقاومت بدون الیاف است. حضور میکرو سیلیس در بتن‌های پر مقاومت، مقدار بالای سیمان، نرخ حرارتی بالایی در بتن ایجاد کرده که باعث ایجاد اختلاف دمای داخل و خارج بتن شده که افزایش جمع شدگی را نتیجه می‌دهد [۴۶][۱۶]. علاوه بر این حضور میکرو سیلیس نیز هنگام واکنش‌های هیدراتاسیون حرارت زیادی را ایجاد کرده و باعث ایجاد پدیده جمع شدگی خود به خودی^{۱۴} می‌شود [۴۷]. افزودن الیاف به بتن پر مقاومت در تمامی سیکل‌ها کاهش جمع شدگی را نتیجه داده است در واقع استفاده از الیاف در بتن مانع از شکل‌گیری و گسترش منافذ و اتصال آن‌ها به یکدیگر می‌شود که در تحقیقات دیگر نیز تأیید شده است [۴۸-۴۹][۲۳]. در سیکل‌های بررسی شده بهترین عملکرد در کاهش میزان جمع شدگی در هر دو شرایط در اثر افزودن الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن به‌طور هم‌زمان بوده است. به‌طوری‌که در سن ۱۸۰ روز میزان بهبود جمع شدگی نمونه‌های *HS-ST-PP*، *HS-ST* و *HS-PP* در دمای محیط در مقایسه با نمونه *HS* به ترتیب ۲۶/۳۹، ۸۴/۴۷ و ۱۳/۱۵ درصد و در دمای ۴۰ درجه به ترتیب ۲۰/۳۳، ۳۴/۳۹ و ۹/۴۴ درصد بوده است. این نتایج عملکرد مثبت الیاف در کاهش جمع شدگی را به دلیل حفظ انسجام بتن و جلوگیری از تغییر شکل نمونه‌ها شده نشان می‌دهد. البته مشاهده می‌شود که تأثیر دما که به‌صورت سیکل گرم شدن نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه حرارت دمنده و سرد شدن نمونه‌ها در آب با دمای محیط باعث افزایش میزان جمع شدگی شده است به‌طوری‌که واکنش‌های شیمیایی که بیشتر تحت تأثیر دما

¹⁴ Autogenous shrinkage

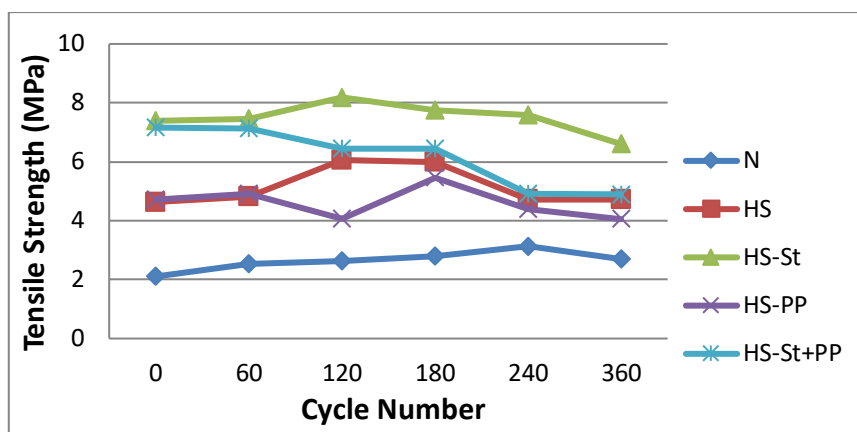
است، موجب شتاب بخشیدن زمان ترک خوردن بتن و جمع شدگی می‌شود. هرچه اختلاف دمای بین سیکل‌های سرد و گرم بیشتر شود به دلیل اختلاف دمای داخل و خارج بتن ترک‌ها و جمع شدگی‌ها نیز افزایش می‌یابد [۵۲-۵۰] و کارایی الیاف را کاهش می‌دهد به طوری که در نمونه‌های *HSC-ST*، *HSC-ST-PP* و *HSC-PP* در دمای ۴۰ درجه حضور الیاف به ترتیب ۵/۰۸، ۶/۷۱ و ۳ درصد نسبت به دمای محیط در کنترل جمع شدگی کارایی خود را از دست داده است. در این میان الیاف *PP* کمتر تحت تأثیر این شرایط قرار گرفته اما الیاف *ST* به دلیل افزایش میزان خوردگی آن افت بیشتری را تجربه کرده است. در واقع عملکرد اصلی الیاف فولادی که چسبندگی تولیدات هیدراتاسیون در فصل مشترک سطح الیاف و ماتریکس است که زنگ‌زدگی الیاف می‌تواند مانع از این پیوستگی و چسبندگی شود [۵۳]. طبق نمودار مشاهده می‌شود، هرچه امتداد سیکل‌های تر و خشک اضافه می‌شود، اثر الیاف نمایان تر است. به طوریکه در نمونه‌های ۲۸ روزه، اختلاف چندانی بین جمع شدگی نمونه‌های بدون الیاف و با الیافهای مختلف دیده نمی‌شود، اما با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک، اثر الیاف و نوع آن در کاهش جمع شدگی واضح تر می‌شود.



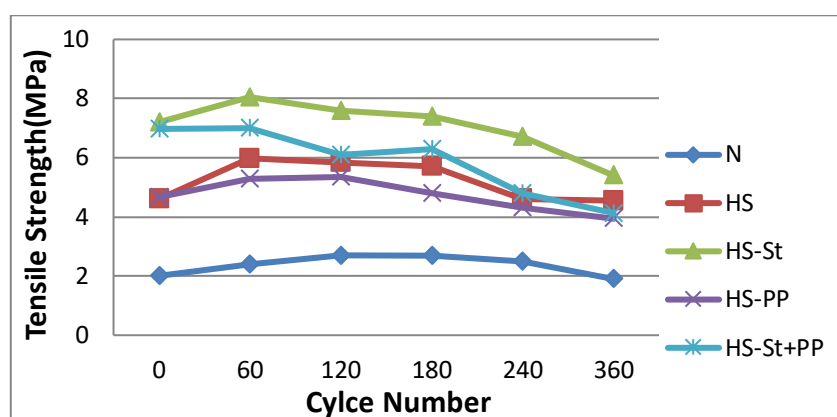
شکل ۷: مقادیر نهایی جمع شدگی در سن ۱۸۰ روز در دمای ۴۰ درجه و دمای محیط.

۲-۳ مقاومت کششی

مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های بتن نرمال (*N*)، بتن پر مقاومت (*HS*)، بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف فلزی (*HS-St*)، بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف پلی‌پروپیلن (*HS-PP*) و بتن‌های پر مقاومت هیبرید حاوی الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن (*HS-St+PP*) در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



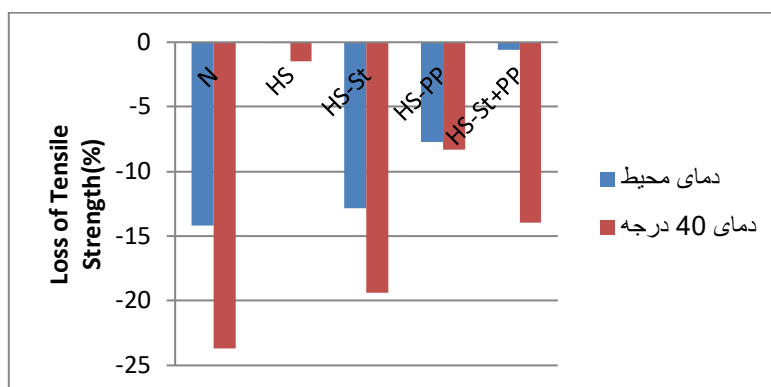
شکل ۸: مقاومت کششی نمونه‌های قرارداده شده در سیکل‌تر و خشک در دمای محیط.



شکل ۹: مقاومت کششی نمونه‌های قرارداده شده در سیکل‌های تر و خشک در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

روند تغییرات مقاومت کششی طی سیکل‌های تحت مطالعه طی سه مرحله صورت گرفته است. مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای محیط در کلیه بتن‌ها یک‌روند صعودی تا حدود ۱۲۰ سیکل را تجربه کرده‌اند سپس یک دوره کوتاه ثابت و پس از آن روند نزولی شروع شده است. در دمای ۴۰ درجه این روند افزایشی تا ۶۰ سیکل ادامه داشته است. بیشترین مقاومت کششی در هر دو دمای مورد مطالعه به ترتیب مربوط به بتن‌های $HS-ST$, $HS-ST-PP$, HS , $HS-PP$ و N است.

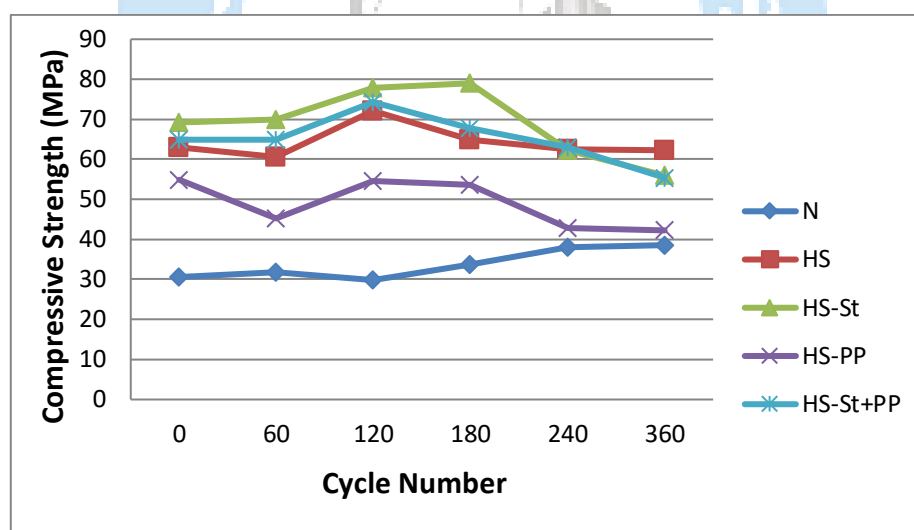
مطابق با نمودار ۹ که میزان افت مقاومت کششی در ۱۸۰ سیکل را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو دمای مورد مطالعه بیشترین افت مقاومت در بتن معمولی دیده می‌شود. به طوری که مقادیر افت آن در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۴/۱۹- و ۲۳/۶۹- درصد است. از طرف دیگر بتن پر مقاومت بدون الیاف کمترین افت مقاومت را از خود نشان داده است که در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه به ترتیب ۱/۱- و ۱/۵- درصد را نشان داده است. در میان بتن‌های الیافی در مورد نمونه‌های قرارداده شده در دمای محیط بتن $HS-ST-PP$ در این دوره مورد مطالعه کمترین افت را نشان داده است، در حالی که بتن $HS-ST$ بیشترین مقدار افت یعنی منفی ۱۲/۸۱٪ را تجربه کرده است که دلیل آن عملکرد مناسب استفاده از الیاف ترکیبی است. در مورد نمونه‌های قرارداده شده در دمای ۴۰ درجه، بهترین عملکرد در کاهش میزان افت مقاومت مربوط به بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف PP است و بتن با الیاف ترکیبی علی‌رغم افت کم آن در دمای محیط، در دمای ۴۰ درجه دچار افت ۱۳/۹۵٪ شده است که در اینجا نیز دلیل آن خوردگی و زنگ‌زدگی الیاف فولادی و کاهش در مقاومت کششی الیاف فولادی است.



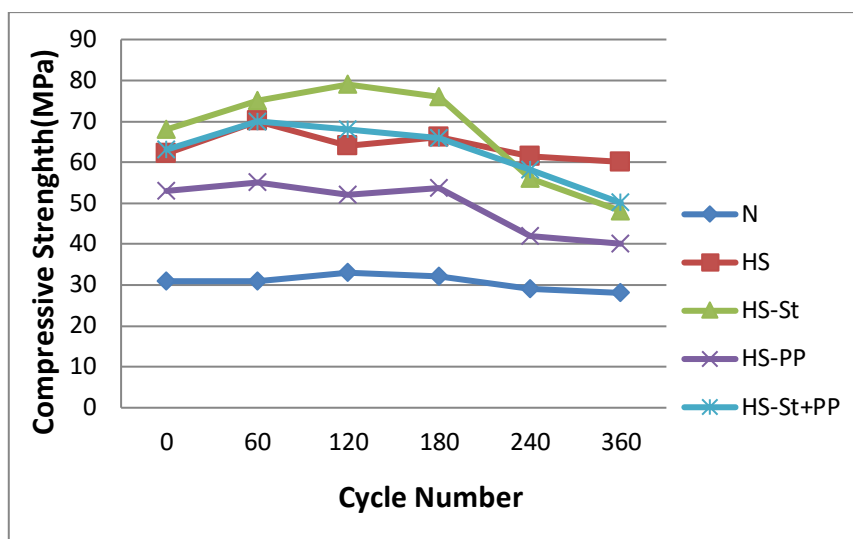
شکل ۱۰: افت مقاومت کششی در ۱۸۰ روز نسبت به ۱۲۰ روز.

۳-۳ مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن نرمال (N)، بتن پر مقاومت (HS)، بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف فلزی (HS-St)، بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف پلی‌پروپیلن (HS-PP) و بتن‌های پر مقاومت هیبرید حاوی الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن (HS-St+PP) در دمای محیط و دمای حدوداً ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت سیکل‌های خشک و تر در دمای محیط.

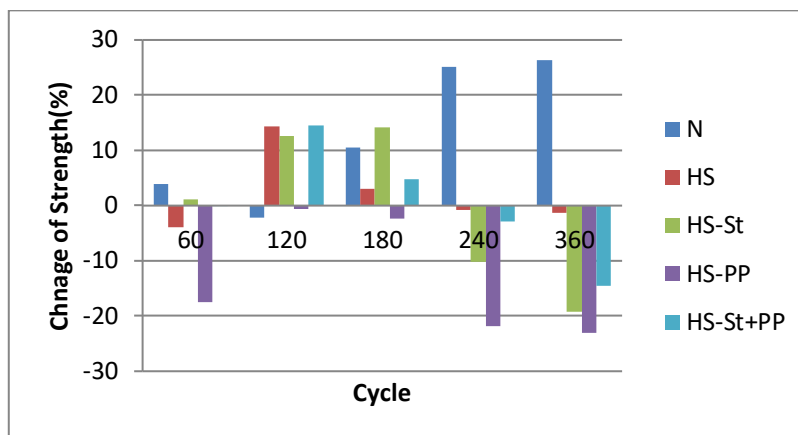


شکل ۱۲: مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت سیکل‌های خشک و تر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

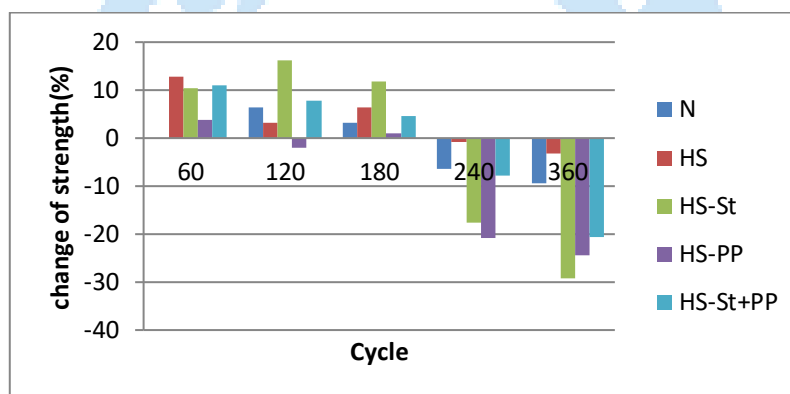
مطابق با نمودارهای فوق، در هر دو دمای مورد مطالعه یعنی دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دمای ۴۰ درجه حرارت دمنده، به‌طور کلی بتن $HS-St$ ، $HS-St+PP$ ، $HS-PP$ و N به ترتیب دارای بیشترین مقاومت فشاری می‌باشند همراه با افت اندکی که در ماکزیمم مقاومت فشاری در کلیه بتن‌ها در دمای ۴۰ درجه دیده شده است. در اکثر بتن‌ها در طی سیکل‌های طی شده، یک مرحله افزایشی در ابتدای سیکل، مرحله تقریباً ثابت در اواسط و افت مقاومت در انتهای مسیر دیده شده است به‌طوری که در نمونه‌هایی که در سیکل‌های تر و خشک در دمای معمولی قرار گرفته‌اند مرحله اول افزایش مقاومت تا حدود ۱۲۰ سیکل ادامه داشته و پس از آن دچار افت شده‌اند، در حالی که زمانی نمونه‌ها تحت حرارت دمنده تا دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند این روند افزایش مقاومت در سیکل‌های زودتری صورت گرفته که در بتن‌های $HS-PP$ ، $HS-St+PP$ ، HS تا سیکل ۶۰ این روند افزایش مقاومت به اوج خود رسیده و سپس روند کاهشی شروع شده است، در مورد بتن $HS-St$ نقطه اوج مقاومت فشاری در دمای معمولی در ۱۸۰ سیکل و در دمای ۴۰ درجه در ۱۲۰ سیکل دیده شده است. این روند افزایش مقاومت تا حدود ۱۲۰ سیکل در مطالعات گذشته نیز دیده شده است. در مطالعه‌ای در مورد بتن معمولی دیده شده است که مقاومت فشاری تا سن ۶۰ روز دارای روند افزایشی بوده است و پس از آن شاهد روند نزولی می‌باشند [۱۰]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر بتن با شکل‌پذیری بالا در محیط‌های سولفاته مختلف، روند افزایشی مقاومت فشاری تا حدود ۶۰ سیکل ادامه داشته و سپس روند کاهشی شروع شده است [۵۵-۵۴] [۵].

دلیل شکل‌گیری این روند و ایجاد مرحله افزایش مقاومت در واقع ورود تولیدات حاصل از ترکیبات شیمیایی در منافذ بتن و واکنش شیمیایی بین این‌ها و سولفات و تولیدات هیدراتاسیون منجر به متراکم شدن آن‌ها می‌باشد، اما مقدار بیش از حد این تولیدات باعث ترک‌هایی در نمونه‌ها می‌شود و به دنبال آن ترک‌ها گسترش و به هم می‌پیوندند که منجر به نفوذپذیری بیشتر یون‌های مخرب و در نهایت باعث تضعیف خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری می‌شود [۵۶] [۲۲]. در واقع این‌ها سولفات منیزیم در خلال پروسه‌ی تر شدن به داخل بتن راه پیدا می‌کنند که وابسته به اختلاف گرادیان رطوبت داخلی و خارجی بتن است و به دنبال آن در پروسه‌ی خشک شدن و تبخیر آب، تمرکز این‌ها در داخل بتن افزایش یافته و تا ۴ الی ۵ برابر موجب افزایش تولیدات کریستاله می‌شود [۵۷]. همان‌طور که از مقایسه نمودارهای ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود پروسه افزایش در مقاومت فشاری در دمای ۴۰ درجه در مورد کلیه بتن‌های تحت مطالعه در تعداد سیکل‌های کمتری رخ داده است که دلیل آن در واقع سریع‌تر خشک شدن نمونه‌ها تحت اثر حرارت دمنده اتاق گرم است. چراکه خشک شدن سریع‌تر روی انتقال رطوبت بتن اثر می‌گذارد. بنابراین، پروسه تر شدن که به دنبال آن رخ می‌دهد، انتقال محلول‌ها و این‌ها به داخل بتن را تسریع و عمق نفوذ در بتن را عمیق‌تر می‌کند. در واقع تولیدات حجم دهنده که در این مطالعه از سولفات منیزیم استفاده شده و

ترینگایت شکل می‌گیرد را تسریع می‌بخشد. نتیجه‌ای تقریباً مشابه در مطالعات دیگر صورت گرفته است که نشان می‌دهد افزایش میزان سرعت خشک شدن زمانی که نسبت زمانی تر و خشک شدن ۱ به ۵ باشد، نتایج مشابه با فرآیند مطالعه حاضر را ایجاد کرده است [۵۶].



شکل ۱۳: نمودار تغییرات مقاومت فشاری در مقایسه با سیکل اول در دمای نرمال.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات مقاومت فشاری در مقایسه با سیکل اول در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

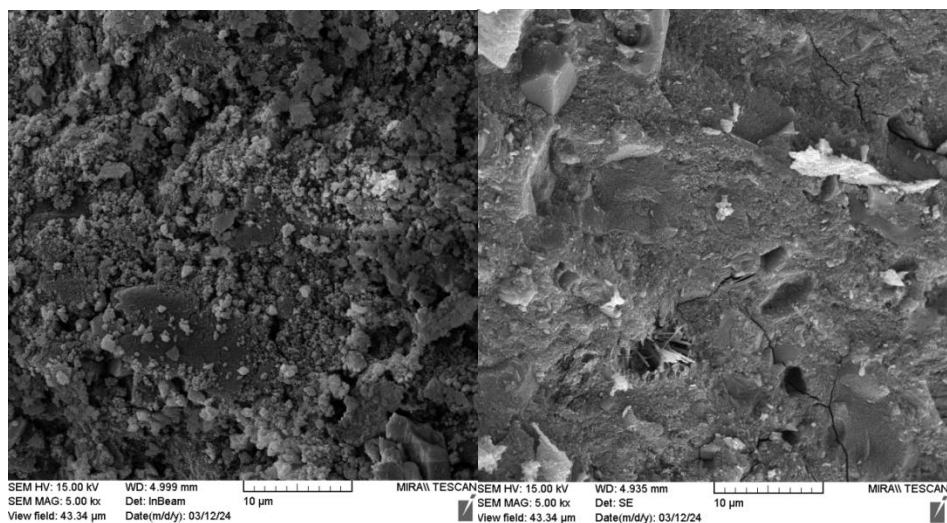
با توجه به نمودارهای ۱۴ و ۱۵ در میان بتن‌های الیافی مورد مطالعه، در شرایط سیکل‌های خشک و تر در دمای محیط به ترتیب بتن‌های $HS-PP$ و $HS-ST+HS-ST-PP$ به ترتیب کمترین افت مقاومت فشاری را از خود نشان داده‌اند، در حالی که در محیط ۴۰ درجه سانتی‌گراد همراه با حرارت دمنده، بتن‌های $HS-ST$ و $HS-PP, HS-ST-PP$ رفتار بهتری را از خود نشان داده‌اند. دلایل آن می‌تواند زنگ‌زدگی زیاد الیاف فولادی تحت سیکل‌های خشک و تری که تحت دمای ۴۰ درجه قرار گرفته‌اند. همچنین رفتار مناسب الیاف PP در حرارت متوسط در مطالعه‌ی حاضر دیده شده است. در مطالعات گذشته نیز به عملکرد مناسب الیاف PP در حرارت و گرما تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد اذعان شده است [۵۸-۵۹]. همچنین علی‌رغم اینکه بتن پر مقاومت بدون الیاف، مقاومت نهایی کمتری را دارد، اما این میزان مقادیر افت در بتن HS دیده نشده است به طوری که در سیکل‌های ۲۴۰ و ۳۶۰ به ترتیب افت مقاومت ۰/۸ و ۱/۳٪ در دمای محیط و ۰/۸، ۳/۱۵٪ در حرارت را تجربه کرده‌اند. دلیل این نکته می‌تواند خوردگی الیاف فولادی ناشی از پدیده خشک و تر شدن‌های متوالی چه در دمای معمولی و چه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد باشد. از سوی دیگر در اثر افزودن الیاف PP به بتن پدیده‌ای به نام خاصیت تویی شدن الیاف ممکن است به وقوع بپیوندد. در این حالت از یک طرف خاصیت تویی شدن موجب ایجاد انفصال ساختار بتن و از طرفی موجب تمرکز تنش شده که شکست زود هنگام بتن را حاصل می‌شود [۶۰-۳۸].

بیشترین میزان افت مقاومت فشاری در نمونه‌های قرار داده شده در دمای محیط مربوط به بتن $HS-PP$ است که در سیکل ۲۴۰ و ۳۶۰ به ترتیب ۲۱/۸۵ و ۲۳/۰۴٪ نسبت به مقاومت سیکل صفر دچار افت شده‌اند. این نکته در مطالعه‌های دیگر نیز نشان داده شده است که خواص دوام و مکانیکی بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف PP به طوری که الیاف فولادی با الیاف PP جایگزین شود موجب کاهش دوام بتن می‌شود [۲۲]. دلیل اصلی آن می‌تواند این نکته باشد که الیاف PP به دلیل مدول الاستیسته پایین به طور مؤثری باعث کنترل ترک‌های ریز اولیه می‌شود و در کنترل ترک‌های ثانویه کم اثرتر است [۲۶-۲۸]. در حالی که این بتن در محیط گرم رفتار بهتری از بتن $HS-ST$ داشته است و مقادیر افت مقاومت فشاری بتن در سیکل ۲۴۰ و ۳۶۰ به ترتیب ۲۰/۸۲ و ۲۴/۴۲٪ است. از سوی دیگر در محیط ۴۰ درجه بتن $HS-ST$ دارای بیشترین افت مقاومت در سیکل‌های ۲۴۰ و ۳۶۰ است که به ترتیب ۱۷/۶۴ و ۲۹/۲۷ درصد است که دلیل آن برمی‌گردد به میزان زنگ‌زدگی زیاد الیاف فولادی موجود در بتنی که در مخزن داخل اتاق گرم قرار داشته‌اند. در شکل ۱۵ این میزان زنگ‌زدگی الیاف فولادی به وضوح دیده می‌شود.

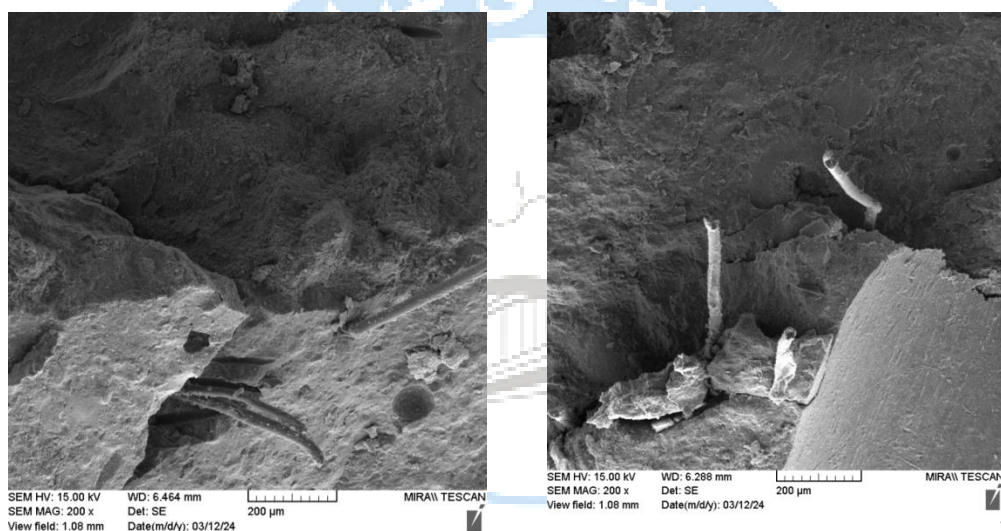
در این راستا نتایجی از تست‌های SEM گرفته شده است به طوری که شکل ۱۶ تصویر با بزرگنمایی $X 500$ نمونه‌های ۲۸ روزه با و بدون الیاف را مقایسه کرده است. در این تصاویر وجود حفره‌های ریز و ترک‌های مویی بخصوص در ملات بدون الیاف و اترینگایت در ملات با الیاف دیده می‌شود. به نظر می‌رسد در ملات معمولی پس از گیرش کامل (۲۸ روزه)، وجود الیاف‌ها موجب کنترل ترک خوردگی در نمونه‌ها شده‌اند. به طور مشابه‌های در شکل ۱۷ که تصاویر ملات‌های مسلح شده با الیاف را پس از گذراندن ۱۸۰ روز سیکل‌های تر و خشک به ترتیب در دمای محیط و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند که می‌توان تأثیر الیاف‌ها بر محدود کردن عرض ترک و توسعه آن‌ها را مشاهده کرد. همچنین اعمال دمای ۴۰ درجه و تسریع در خشک شدن بتن احتمال ایجاد ترک‌ها و تمرکز تنش در محل تماس بتن و الیاف را افزایش می‌دهد. الیاف PP عمدتاً در کنترل میکرو ترک‌ها و الیاف ST در کنترل ماکرو ترک‌ها نقش مؤثری دارند. در مقایسه تصاویر شکل ۱۸ که تصاویر با بزرگنمایی $X 500$ از ملات‌های با و بدون الیاف در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد پس از گذراندن ۳۶۰ سیکل تر و خشک هستند، به خوبی کنترل ترک‌های اصلی توسط الیاف دیده می‌شوند، اگرچه در اطراف الیاف‌ها، ترک‌های موضعی بیشتری نسبت به حالت بدون الیاف دیده می‌شود و علت آن ایجاد تمرکز تنش موضعی در پروسه‌ی تر و خشک شدن متوالی و نیز ناشی از اثر حرارت است.



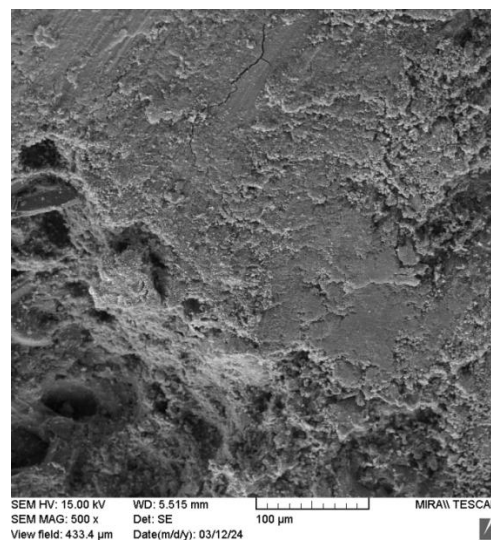
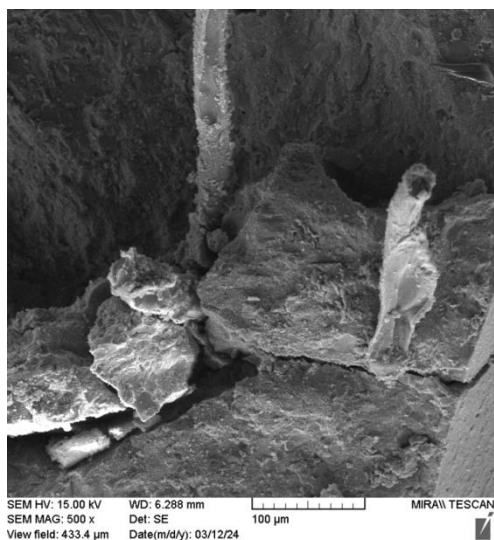
شکل ۱۵: تصویر زنگ‌زدگی الیاف فولادی تحت سیکل‌های تر و خشک.



شکل ۱۶: بتن پر مقاومت ۲۸ روزه بدون الیاف (شکل راست) و با الیاف (شکل چپ).



شکل ۱۷: بتن پر مقاومت با الیاف پس از گذردن ۱۸۰ روز سیکل تر و خشک در دمای محیط (شکل چپ) و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (شکل راست).



شکل ۱۸: بتن پر مقاومت در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و در سن ۱۸۰ روز با الیاف (تصویر چپ) و بدون الیاف (تصویر راست)

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر افزودن الیاف فلزی، پلی پروپیلن و ترکیبی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جمع شدگی بتن‌های پر مقاومت پس از گذراندن ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۶۰ سیکل متوالی خشک و تر شدن در آب حاوی سولفات منیزیم در دو دمای محیط و دمای ۴۰ درجه حاصل از یک بخاری دمنده هوای گرم بررسی شد. ارزیابی جامع آزمایش‌ها به نتایج زیر منجر گردید:

۱. با مقایسه مقاومت کششی و فشاری در دو شرایط مختلف سیکل‌های تر و خشک یعنی در دمای معمولی و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (که معرف هوای گرم در نواحی جنوبی ایران است) نشان داده شده است که حرارت موجب تسریع در افزایش مقاومت اولیه بتن‌ها می‌شود. دلیل آن سریع‌تر خشک شدن نمونه‌ها تحت اثر حرارت دمیده شده که روی انتقال رطوبت بتن اثرگذار است.
۲. با تداوم مواجهه بتن با شرایط سیکل تر و خشک، در هر مرحله که عمل‌تر شدن اتفاق می‌افتد، سرعت انتقال سولفات منیزیم به داخل بتن سریع‌تر شده و عمق نفوذ بتن را عمیق‌تر کرده و شکل‌گیری اترینگایت را تسریع می‌بخشد.
۳. نشان داده شده است که در محیط ۴۰ درجه سانتی‌گراد بتن *HS-ST* دارای بیشترین افت مقاومت فشاری و کششی بوده است، به طوری که در مورد مقاومت فشاری در سیکل‌های ۲۴۰ و ۳۶۰ به ترتیب ۱۷/۶۴ و ۲۹/۲۷ درصد افت را تجربه کرده است.
۴. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند اگرچه با افزودن سیکل‌های خشک و تر، مقاومت فشاری و کششی با و بدون الیاف کاهش می‌یابد ولی افت مقاومت در بتن با الیاف کمتر است.

۵. مقاومت فشاری و کششی بتن با الیاف و بدون الیاف وقتی در معرض حرارت ۴۰ درجه سانتیگراد قرار می گیرند، نسبت به دمای محیط افت بیشتری را تجربه می کنند.
۶. مقایسه نمونه ها در سیکل های مختلف و دماهای متفاوت نشان داده است نمونه های بتنی با الیاف هیبرید بهترین عملکرد و کمترین افت مقاومت را داشته اند. لازم به ذکر است مقاومت کششی این نمونه ها علی رغم افت کم در دمای محیط، در دمای ۴۰ درجه دچار افت ۱۳/۹۵- درصد شده است. دلیل آن خوردگی، زنگ زدگی و کاهش مقاومت کششی الیاف فولادی در شرایط مذکور است.
۷. مطابق با نتایج حاصل از تست جمع شدگی، در هر دو حالت دمای معمولی و دمای ۴۰ درجه بتن پر مقاومت بدون الیاف دارای بیشترین میزان جمع شدگی و بتن *HS-PP-ST* دارای کمترین میزان جمع شدگی است. در سن ۱۸۰ روز میزان کاهش جمع شدگی نمونه های *HS-PP-ST*، *HS-ST* و *HS-PP* در دمای محیط در مقایسه با نمونه *HS* به ترتیب ۳۹/۴۷، ۲۶/۸۴ و ۱۳/۵ درصد و در دمای ۴۰ درجه به ترتیب ۳۴/۳۹، ۲۰/۳۳ و ۹/۴۴ درصد بوده است که نشان دهنده اثر مثبت الیاف و بخصوص الیاف ترکیبی می باشد.
۸. تأثیر دما که به صورت سیکل های گرم و سرد شدن که در دمای ۴۰ درجه حرارت که باعث گرم شدن نمونه ها و به دنبال آن سرد شدن در آب با دمای محیط بوده است باعث افزایش میزان جمع شدگی و شتاب بخشیدن زمان ترک خوردگی می شود. همچنین سرد و گرم شدن همراه با سیکل خشک و تر شدن، کارایی الیاف را نیز کاهش داده به طوری که در نمونه های *HS-ST-PP*، *HS-PP* و *HS-ST* در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد حضور الیاف به ترتیب ۵،۶/۰۸ و ۳/۷۱ درصد نسبت به دمای محیط در کنترل جمع شدگی کارایی خود را از دست داده است. در این میان الیاف *PP* کمتر تحت تأثیر بوده و الیاف *ST* افت بیشترین را تجربه کرده است. از این پیشنهاد می شود، از طرح های بتن پر مقاومت هیبرید از مقادیر بیشتری از الیاف *PP* و مقادیر کمتری الیاف فولادی استفاده شود. همچنین از الیاف فولادی با طول کمتر نیز به عنوان گزینه ای برای بهبود عملکرد الیاف هیبرید است.

مراجع:

- [1] Mahmoud. A, Adel. M, Abdelghafour.O, and Elsayed. T. (2016). Evaluation of field concrete deterioration under real conditions of seawater attack. *Constr. Build. Mater.*, vol. 119, pp. 130–144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.014.
- [2] Clifton . J. R, Frohnsdorff. G, and Ferraris.C. (1998). Standards for evaluating susceptibility of cement based materials to ESA. Seminar on sulfate attack mechanism.
- [3] Wang. K, Guo.J, Wu. H, and Yang. L. (2020). Influence of dry-wet ratio on properties and microstructure of

- concrete under sulfate attack. *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120635. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120635.
- [4] Tian. W, and Han. N. (2017). Experiment Analysis of Concrete's Mechanical Property Deterioration Suffered Sulfate Attack and Drying-Wetting Cycles. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 367, p.13436. doi: 10.1155/2017/5673985.
- [5] Guo. X and Xiong. G. (2020). Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles. *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, no. xxxx, p. 121326, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121326.
- [6] Chemrouk. M. (2015). The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete. *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 713–724. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.112.
- [7] Ma.H, Gong. W, Yu. H, and Sun.W. (2018). Durability of concrete subjected to dry-wet cycles in various types of salt lake brines. *Constr. Build. Mater.*, vol. 193, pp. 286–294. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.211.
- [8] Bernard. E, Lothenbach. B, Le Goff. F, and Pochard. I. (2016). Effect of magnesium on calcium silicate hydrate (C-S-H). *Procedia Eng.*, vol 117, p.100354.
- [9] Yi. Y, Zhu. D, Guo. S, Zhang. Z, and Shi. C. (2020). A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cem. Concr. Compos.*, vol. 113, no. May, p. 103695. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103695.
- [10] Zhou.Y, Tian. H, Sui. L, Xing. F, and Han. N. (2015). Strength Deterioration of Concrete in Sulfate Environment: An Experimental Study and Theoretical Modeling. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015,p.130455. doi: 10.1155/2015/951209.
- [11] Zuo. S, Xiao. J, and Yuan. Q. (2020). Comparative study on the new-old mortar interface deterioration after wet-dry cycles and heat-cool cycles. *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, p. 118374. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118374.
- [12] Uliana Marushchak , Nazar Sydor, Serhii Braichenko , and Marko Hohol.” **Effect of Dry–Wet Cycles on Properties of High Strength Fiber-Reinforced Concrete**”. CEE 2023, LNCE 438, pp. 265–272, 2024. DOI.org/10.1007/978-3-031-44955-0_27
- [13] Poursaee. A and Hansson. C. M. (2008). The influence of longitudinal cracks on the corrosion protection afforded reinforcing steel in high performance concrete. *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 8–9, pp. 1098–1105. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.03.018.
- [14] Yang. Y, Xu. S, Ye . D, and Wang. Z. (2009). Tensile creep behavior of high strength concrete at early ages. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ J. Chinese Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 7, pp. 1124–1129.
- [15] Yu. K, Yu. J, and Lu. Z. (2016). Fracture properties of high-strength / high-performance concrete (HSC / HPC) exposed to high temperature. *Mater. Struct.*, vol 233,p 11346, doi: 10.1617/s11527-016-0804-x.
- [16] Shen. D, Kang. J, Yi. X , Zhou. L , and Shi. X. (2019). Effect of double hooked-end steel fiber on early-age cracking potential of high strength concrete in restrained ring specimens. *Constr. Build. Mater.*, vol. 223, pp. 1095–1105. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.319.
- [17] Yang. J, Tang. X , Wang. H, Wang. Q, and Cosgrove. T. (2021). Durability and Compression Properties of High-Strength Concrete Reinforced with Steel Fibre and Multi-walled Carbon Nanotube. *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 45, no. 3, pp. 1539–1563. doi: 10.1007/s40996-020-00419-4.
- [18] Yew. M. K, Othman. I, Yew. M. C, Yeo. S. H, and Mahmud. H. B. (2011). Strength properties of hybrid nylon-steel and polypropylene-steel fibre-reinforced high strength concrete at low volume fraction. *Physical sciences*, vol. 6, no. 33, pp. 7584–7588. doi: 10.5897/IJPS11.736.
- [19] Fallah. S, and Nematzadeh. M. (2016). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 170–187. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100.
- [20] Song. P. S. (2004). Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel – polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.002.
- [21] Hasan-Nattaj. F, and Nematzadeh. M. (2017). The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of

- high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica. *Constr. Build. Mater*, vol. 137, pp. 557–572. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.078.
- [22] Usman Rashid. M. (2020). Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action. *Constr. Build. Mater*, vol. 250, p. 118910. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118910.
- [23] Raczkiewicz.W. (2021). Use of polypropylene fibres to increase the resistance of reinforcement to chloride corrosion in concretes. *Sci. Eng. Compos. Mater*, vol. 28, no. 1, pp. 555–567. doi: 10.1515/secm-2021-0053.
- [24] Srikumar. R , Das.B.B, and Goudar. S. K. (2019). Durability studies of polypropylene fibre reinforced concrete. *Springer Singapore*, vol. 25,p 180-194
- [25] Sciarretta. F. (2021). Ultra-High performance concrete (UHPC) with polypropylene (Pp) and steel Fibres: Investigation on the high temperature behaviour. *Constr. Build. Mater*, vol. 304, no. September, p. 124608. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124608.
- [26] Zhong. H, and Zhang. M. (2020). Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres. *J. Clean. Prod*, vol. 259, p. 120914. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120914.
- [27] Deng. F, Xu. L, Chi. Y, Wu. F, and Chen. Q. (2020). Effect of steel-polypropylene hybrid fiber and coarse aggregate inclusion on the stress–strain behavior of ultra-high performance concrete under uniaxial compression. *Compos. Struct*, vol. 252, p. 112685. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112685.
- [28] Guo. H , Jiang. L , Tao. J, Chen. Y, Zheng. Z , and Jia. B. (2020). Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness. *Constr. Build. Mater*, vol. 275, p. 122132. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122132.
- [29] Wang. D, Shi. C , Wu. Z , Xiao. J , Huang. Z , and Fang. Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Constr. Build. Mater*, vol. 96, pp. 368–377. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095.
- [30] Wang. D, Ju.Y, Shen. H , and Xu. L. (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Constr. Build. Mater*, vol. 197, pp. 464–473. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181.
- [31] Bangi. M. R, and Horiguchi.T. (2011). Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cem. Concr. Res*, vol. 41, no. 11, pp. 1150–1156. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.07.001.
- [32] Lu. X, and Hsu.C. T. (2006). Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression. *Cement and concrete research*, vol. 36, pp. 1679–1685. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.05.021.
- [33] Kaïkea. A, Achoura. D, Duplan. F , and Rizzuti. L. (2014). Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete. *Mareial and design* ,vol. c, pp. 493–499. doi: 10.1016/j.matdes.2014.06.066.
- [34] Smarzewski. P. (2019). Study of toughness and macro/micro-crack development of fibre-reinforced ultra-high performance concrete after exposure to elevated temperature. *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 8. doi: 10.3390/ma12081210.
- [35] Kim. B, Boyd. A. J, Kim. H. S, and Lee. S. H. (2015). Steel and synthetic types of fibre reinforced concrete exposed to chemical erosion. *Constr. Build. Mater*, vol. 93, pp. 720–728. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.023.
- [36] Afroughsabet. V, and Ozbakkaloglu.T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater*, vol. 94, pp. 73–82. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
- [37] Smarzewski. P, and Barnat-Hunek. D. (2017). Effect of Fiber Hybridization on Durability Related Properties of Ultra-High Performance Concrete. *Int. J. Concr. Struct. Mater*, vol. 11, no. 2, pp. 315–325. doi: 10.1007/s40069-017-0195-6.

- [38] Afrouhsabet. V, Biolzi. L, and Monteiro. P. J. M. (2018). The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. *Compos. Part B Eng*, vol. 139, pp. 84–96. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.11.047.
- [39] C. ASTM. (2003). Standard specification for concrete aggregates. Philadelphia, PA Am. Soc. Test. Mater.
- [40] <https://www.iranemart.com/fa/article/838>
- [41] C. Take (2002). slump tests for every test cylinders in accordance with ANSI,” ASTM C143, 1AD.
- [42] A. C. I. Committee. (2014). No reproduction or networking permitted without license from IHS.
- [43] C. C. Test, T. Drilled, C. Concrete, and B. Statements. (2009). Standard Test Method for. pp. 2–6.
- [44] M. Cabinets, M. Rooms, D. Mass, and A. Iron. (2012). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste , Mortar , and Concrete 1. pp. 11–15. doi: 10.1520/C0490.
- [45] S. T. Method. (2009). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and. pp. 1–7.
- [46] Pan. Z, and S. Meng. (2016). Three-level experimental approach for creep and shrinkage of high-strength high-performance concrete. *Eng. Struct*, vol. 120, pp. 23–36. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.04.009.
- [47] Mazloom. M , Ramezani pour. A. A, and Brooks. J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos*, vol. 26, no. 4, pp. 347–357. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00017-9.
- [48] Shah. A. A, and Ribakov. Y. (2011). Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Mater. Des*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4122–4151. doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.030.
- [49] Bouziadi. F, Boulekbache. B, Haddi. A , Djelal. C, and Hamrat. M. (2018). Numerical analysis of shrinkage of steel fiber reinforced high-strength concrete subjected to thermal loading. *Constr. Build. Mater*, vol. 181, pp. 381–393. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.054.
- [50] Li. Y, Yang. E. H, and Tan. K. H. (2019). Effects of heating followed by water quenching on strength and microstructure of ultra-high performance concrete. *Constr. Build. Mater*, vol. 207, pp. 403–411. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.123.
- [51] Kovler. K, and Zhutovsky. S. (2006) .Overview and future trends of shrinkage research. *Mater. Struct. Constr*, vol. 39, no. 9, pp. 827–847. doi: 10.1617/s11527-006-9114-z.
- [52] Asamoto. S, Ohtsuka. A, Kuwahara. Y, and Miura. C. (2011). Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete. *Cem. Concr. Res*, vol. 41, no. 6, pp. 590–601. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.003.
- [53] Zhang. X , Liu. Z , and Wang. F. (2019). Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete. *Constr. Build. Mater*, vol. 226, pp. 459–468. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.177.
- [54] Prinya Chindapasirt, Apichit Kampala, Peerapong Jitsangiam, Ratchanon Sakdinakorn, Pattawitchaya Daprom, Wunchock Kroehong (2023). Effects of sulfate attack under wet and dry cycles on strength and durability of Cement-Stabilized laterite, *Construction and Building Materials* 365 (2023) 129968. DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129968
- [55] Li. L, and Shi. J. (2021). Experimental Study on Mechanical Properties of High-Ductility Concrete against Combined Sulfate Attack and Dry – Wet Cycles. *Materials* 2021, 14, 4035. pp. 1–15. doi-org/10.3390/ma14144035
- [56] U. S. Attack. (2019). E ff ect of Dry–Wet Ratio on Properties of Concrete Under Sulfate Attack. *Materials* 2019, 12, 2755. doi10.339/ma 12172755
- [57] Neville. A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cem. Concr. Res*, vol. 34, no. 8, pp. 1275–1296. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.004.
- [58] Choe. G, Kim. G, Kim. H, Hwang. E, Lee. S, and Nam. J. (2019). Effect of amorphous metallic fiber on mechanical properties of high-strength concrete exposed to high-temperature. *Constr. Build. Mater*, vol. 218, pp. 448–456. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.134.

- [59] Ghasem Pachideh | Vahab Toufigh. (2021). Strength of SCLC recycle springs and fibers concrete subject to high temperatures, International Federation for Structural Concrete.;1-15. DOI: 10.1002/suco.202100183
- [60] Afrouhsabet. V, and Ozbakkaloglu. T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building Materials*, vol. 94, pp. 73-82.







