



Research Article

Evaluation of mechanical characteristics of high strength concretes reinforced with steel and polypropylene fibers exposed to wet and dry cycles in magnesium sulfate environment

Ramezanali Izadifard ^{1*}, Masoud Dekhoda Rajabi ²

1*-Associate professor, Civil Eng. Dep.Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2-Structural Engineering Ph.D. candidate, Azad Islamic University, Qazvin, Iran

Received: 06 March 2024; Revised: 30 March 2024; Accepted: 05 April 2024; Published: 05 April 2024

Abstract:

Concrete Damaging and reduction of durability characteristics under sulfate attack is one of the important matters. Compared to the situation where concrete is always immersed in sulfate environments, the damages caused in dry and wet conditions are more complex. The dry and wet cycle is a significant factor that affects on the sulfate attack of concrete. Some concrete structures such as piers, are subject to wet and dry cycles due to sea tides, which causes a continuous process of destructive ions entering to the concrete matrix during wetting, and increasing cracks during the drying process. Considering the wide using of high-strength concrete and the weaknesses of this concrete in the mentioned conditions, the present study has investigated the compressive strength, tensile strength, separation and shrinkage test of HS, FRHSC concrete reinforced with polypropylene (PP), steel (ST) and hybrid fibers under the conditions of dry and wet cycles in the environment containing magnesium sulfate for 6 months. The results of this study show that although dry and wet cycles reduce the strength of concrete containing steel fibers, the effect of these fibers in increasing the compressive and tensile strength of HS concrete is much greater compared to PP fibers. The use of steel fibers, polypropylene and a combination of steel fibers and polypropylene has reduced the shrinkage of high-strength concrete samples by 13, 24 and 33%, respectively (compared to HS concrete without fibers).

Keywords: high-strength concrete, steel and PP fibers, wet and dry cycle, shrinkage, composite fibers

Cite this article as: Dekhoda Rajabi, M., & izadifard, R. (2024). Evaluation of mechanical characteristics of high strength concretes reinforced with steel and polypropylene fibers exposed to wet and dry cycles in magnesium sulfate environment. Civil and Project, 6(2), 38-60.
<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.447120.1265>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Corresponding author E-mail address: izadifard@eng.ikiu.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpijournals.com/>

ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن‌های پر مقاومت مسلح شده به الیاف فلزی و پلی پروپیلن در معرض سیکل‌های تر و خشک حاوی سولفات منیزیم

رضاعلی ایزدی فرد^{۱*}، مسعود دهخدا رجیب^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- کاندیدا دکتری سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین ایران

تاریخ دریافت: ۱۶ اسفند ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۱ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۷ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ اولین انتشار آنلاین: ۱۷ فروردین ۱۴۰۳

چکیده:

آسیب‌دیدگی بتن و کاهش ویژگی‌های دوام بتن تحت حملات سولفاته از موضوعات حائز اهمیت است. در مقایسه باحالتی که بتن در محلول‌های سولفاته همیشه غوطه‌ور است، آسیب‌های وارد شده در محیط‌های خشک و تر پیچیده‌تر است. در واقع سیکل خشک و تر عاملی قابل توجه بوده که روی حمله سولفاته‌ای بتن اثرگذار است. برخی سازه‌های بتنی همچون اسکله‌ها به دلیل نوسانات مکرر سطح آب در معرض سیکل‌تر و خشک می‌باشند و موجب ایجاد یک پروسه ادامه‌دار شده که یون‌های مخرب به ماتریکس در خلال تر شدن وارد می‌شود و ترک‌های بیشتری در پروسه خشک شدن تولید می‌شود. با توجه به گسترش استفاده از بتن پر مقاومت و ضعف‌های این بتن در شرایط مذکور، مطالعه‌ی حاضر بر آن دارد که میزان و نحوه‌ی عملکرد بتن HS و FRHSC مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن (PP) و فولادی (ST) و اثر توأم آن‌ها را تحت شرایط سیکل‌های خشک و تر حاوی سولفات منیزیم در مدت ۶ ماه و از طریق ارزیابی مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جدایش و تست جمع شدگی بررسی کند. از جمله مهم‌ترین نتایج این مطالعه این است که علی‌رغم افت مقاومت بیشتر بتن حاوی الیاف فولادی در سیکل‌های خشک و تر اما الیاف فولادی در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن HS در مقایسه با الیاف پ پ بسیار تأثیرگذارتر است و رفتار بهتر آن در طی سیکل‌های مورد بررسی است به طوری که میزان بهبود در نتایج جمع شدگی نمونه‌های بتن پر مقاومت حاوی الیاف ترکیبی فولادی و پلی پروپیلن، حاوی الیاف استیل و حاوی الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با بتن پر مقاومت بدون الیاف به ترتیب ۲۳، ۲۴ و ۱۳ درصد بوده است.

کلمات کلیدی: بتن پر مقاومت، الیاف PP و استیل، سیکل‌تر و خشک، انقباض، الیاف ترکیبی

پست الکترونیک نویسنده مسئول: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

بتن به دلیل مزایایی همچون هزینه پایین در مقایسه با مواد دیگر و در دسترس بودن، یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت است. اگرچه یکی از ویژگی‌های مهم بتن مقاومت فشاری مطلوب آن است، خواص کششی ضعیف و شکل‌پذیری کم از معایب آن است (Fallah & Nematzadeh, 2017; Junwei et al., 2021; Tran & Ghosh, 2020). مصرف عمده به تنهای نرمال در مصارف عمومی رایج است، این در حالی است که به‌منظور کاربرد این مصالح ساختمانی در شرایط ویژه نیاز به بهبود برخی از مشخصات بتن است. ضعف بتن‌های نرمال در برخی مشخصات، باعث شده است تا محققین با تغییر در مواد تشکیل‌دهنده بتن و افزودن مواد افزودنی این ضعف‌ها را جبران کنند. این تلاش‌ها باعث پیدایش بتن‌هایی با خواص ویژه‌ای همچون مقاومت بالا، دوام بالا، شکل‌پذیری و چقرمگی بالا شده است [۱] [۳] [۴]. از جمله این بتن‌ها می‌توان به بتن با مقاومت بالا *HSC* (Fallah & Nematzadeh, 2017)، بتن با عملکرد بالا *HPC* (Junwei et al., 2021)، بتن فوق توانمند *UHPC* (Faried et al., 2021) و کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی‌شده *ECC* (Hongqiang Ma et al., 2021) اشاره کرد. استفاده از بتن با مقاومت بالا (*HSC*) در سال‌های اخیر در صنایع ساختمانی رو به افزایش بوده است. خواص مکانیکی و دوام بهتر این نوع از بتن‌ها به همراه نفوذپذیری کمتر باعث کاربرد آن‌ها در ساختمان‌های بلندمرتبه و پل‌ها شده است (Poursae & Hansson, 2008; Y. Yang et al., 2009; Yu et al., 2016). یکی از ضعف‌های بتن پر مقاومت در مقایسه با سایر بتن‌ها رفتار ترد آن است [۱۵] [۱۶]. این ضعف در شرایطی همچون زلزله، دماهای بالا و پدیده ذوب و یخ متوالی تشدید می‌آید. به‌منظور بهبود برخی از مشخصات بتن می‌توان از الیاف استفاده کرد (Abdi Moghadam & Izadifard, 2021). انواع مختلفی از الیاف در پژوهش‌های پیشین به‌منظور بررسی مشخصات بتن‌ها بررسی شدند که هرکدام از این الیاف با توجه به نوع ساخت و مشخصات خود از جمله مقاومت کششی، نسبت ابعادی، جنس و درصد الیاف به‌کاررفته تأثیر خاصی بر مشخصات بتن داشتند (Abdi Moghadam et al., 2022; Abdi Moghadam & Izadifard, 2020; Hannawi et al., 2016; Izadifard & Abdi Moghadam, 2021; Naraganti et al., 2019).

بر اساس مطالعات پیشین افزودن الیاف مختلف باعث کاهش ترک‌ها و جلوگیری از باز شدن عرض آن‌ها، افزایش مقاومت کششی و شکل‌پذیری می‌شود (S. Feng et al., 2020; Hong et al., 2020; Kaish et al., 2020; Vajdian et al., 2020; Zhao et al., 2020). در میان انواع مختلفی از الیاف، الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل هزینه و وزن پایین آن، بیشترین توجه را در میان محققین به خود اختصاص داده است (Abdi Moghadam et al., 2022). (Fallah & Nematzadeh, 2017) (Afrouhsabet & Ozbakkaloglu, 2015) (Mokhtari & Fatemian, 2023). یکی دیگر از الیاف پرکاربرد الیاف فلزی می‌باشند. بر اساس مطالعات پیشین، الیاف فلزی بر بهبود مقاومت فشاری بتن‌های پر مقاومت تأثیرگذارند و مد شکست را از شکنندگی به شکل‌پذیر تغییر می‌دهند (J. Yang et al., 2021). الیاف فولادی با خاصیت پل زدگی در مقاطع ترک‌خورده انتقال تنش را بهبود داده و منجر به بهبود رفتار کششی می‌شود (Abdallah et al., 2016) (J. Feng et al., 2014). سانگ و همکاران تأثیر الیاف فولادی را روی مقاومت فشاری بتن‌های پر مقاومت در مقادیر ۰،۵، ۱، ۱،۵ و ۲٪ مطالعه کردند. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۱،۵٪ الیاف به‌دست‌آمده است که مقاومت فشاری حدود ۱۵،۳٪ بیشتر از نمونه‌ی بدون الیاف بوده است (Song & Hwang, 2004).

کاربرد طیف وسیعی از الیاف به منظور بهبود مشخصات بتن هم به صورت تکی و هم به صورت ترکیبی از آن‌ها مرسوم است. از آنجایی که با توجه به کاربرد عضو بتنی، استفاده از یک نوع الیاف ممکن است نیاز مهندسان را برآورده ننماید، لزوم استفاده از الیاف ترکیبی روشن می‌شود. بررسی مطالعات گذشته نشان داده است که استفاده از الیاف ترکیبی می‌تواند بر بهبود مشخصات بتن تأثیرگذار باشد (Abaeian et al., 2018; Varona et al., 2018; Xu et al., 2020). بررسی تأثیر الیاف سلولز (CTF)، الیاف پلی وینیل الکل (PF) و الیاف پلی الفین به طور تکی و ترکیبی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت برشی بتن در پژوهشی دیگر مورد بررسی قرار گرفته است (Xu et al., 2020). ریزساختارهای نمونه بتن مسلح با الیاف و همچنین رابطه تنش کرنش نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که الیاف CTF به تنهایی مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد، اگرچه مقاومت کششی را تضعیف کرده است. همچنین الیاف PF مقاومت کششی و مقاومت فشاری را تضعیف می‌کند. در این مطالعه کاربرد هم‌زمان ۱٫۵ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف سلولز (CTF) با ۱٫۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف پلی وینیل الکل (PF) ترکیب مطلوبی را نشان داده است (Xu et al., 2020). مطالعات پیشین نشان داده است که ترکیب الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن نیز بر بهبود خواص بتن مؤثر است (Zhong & Zhang, 2020). ترکیب الیاف PP و ST در بتن می‌تواند به طرز مؤثری به وسیله‌ی محدود کردن بروز و رشد ترک‌های بتن عملکرد بتن را بهبود بخشد (Wang et al., 2015). افروغ ثابت و همکاران اثر الیاف ترکیبی PP و ST با درصد حجمی ۱٪ روی خواص مکانیکی و دوام بتن پر مقاومت بررسی کردند و نتایج نشان داد که خواص مکانیکی و دوام بهتری برای این نوع بتن حاصل شده است (Afroughsabet & Ozbakkaloglu, 2015). همچنین در مطالعه‌ای دیگر ترکیب این دو نوع الیاف در بتن‌های پر مقاومت باعث افزایش مقاومت کششی شده است (H. Guo et al., 2021). در ارتباط با دوام بتن‌های پر مقاومت نیز اثر هم‌زمان این دو الیاف بهبود عملکرد بتن‌های پر مقاومت در معرض سیکل‌های تر و خشک را نتیجه داده است (Smarzewski & Barnat-Hunek, 2017). افروغ ثابت و همکاران در مطالعه‌ای دیگر از الیاف PP و الیاف ST و ترکیب دو الیاف در محیط انتشار کلراید استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از دو نوع الیاف یک‌راه مؤثر به منظور بهبود خواص بتن و مخصوصاً کاهش جمع‌شدگی است. همچنین استفاده از الیاف PP منجر به کاهش انتشار کلراید می‌شود در حالی که الیاف ST به طور عمده‌ای موجب افزایش انتشار کلراید در بتن می‌شود (Afroughsabet et al., 2018). در مطالعات دیگر که اثر هم‌زمان الیاف فلزی و PP را بر مشخصات دوام بتن بررسی کردند اثر مثبت این الیاف را بر مقاومت بتن‌های $UHPC$ نشان داد (Smarzewski, 2019).

اگرچه مطالعات متعددی در رابطه با رفتار بتن‌های پر مقاومت در شرایط عادی انجام شده است، اطلاعات اندکی در رابطه با رفتار بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف در معرض سیکل‌های تر و خشک موجود است. بررسی عملکرد سازه‌های بتنی در این شرایط می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ایمنی و سرویس‌دهی این سازه‌ها داشته باشد (Haiyan Ma et al., 2018). شرایط تر و خشک در شرایط واقعی برای سازه‌های در معرض نواحی تغییر سطح آب (جزر و مد) و نواحی پاشش موج اقیانوس‌ها رخ می‌دهد که در این شرایط نفوذ یخ‌ها به داخل بتن رخ خواهد داد. نفوذ این مواد زیان‌آور به داخل بتن از یک سو و اثرات روند تر شدن و خشک شدن باعث اثرات نامطلوبی بر عملکرد بتن می‌شود. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در محیط‌های در معرض سیکل خشک و تر شدن مهم‌ترین عامل آسیب سولفات‌ها می‌باشند و همچنین نرخ آسیب بالاتر از حالتی است که بتن برای مدت طولانی غوطه‌ور است (Tian & Han, 2017) (Clifton et al., 1998). این نتیجه در مطالعات یوان و همکاران نیز تأیید شده است (Yuan et al., 2016). بیشترین نمک‌های متداول که به بتن آسیب وارد می‌کند شامل سولفات کلسیم، سولفات سدیم، سولفات پتاسیم و سولفات منیزیم است (Chemrouk, 2015). در این میان منیزیم در واکنش با یون‌های

هیدروکسید موجب تولید بروسیت^۱ می‌شود یا به‌صورت جایگزینی کلسیم در هیدرات سیلیکات کلسیم موجب خرابی در بتن می‌گردد (Haiyan Ma et al., 2018).

ارزیابی جامع مطالعات پیشین این واقعیت را روشن کرد که اطلاعات کافی در مورد خواص مکانیکی بتن‌های پر مقاومت مسلح شده به انواع مختلفی از الیاف تحت سیکل‌های تر و خشک به‌ویژه در محیط مخرب یافت نمی‌شود؛ بنابراین در این پژوهش مشخصات مکانیکی نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن (PP)، فولادی (ST) و ترکیب این دو الیاف تحت شرایط سیکل‌های خشک و تر حاوی سولفات منیزیم در مدت ۶ ماه انجام می‌شود. در این مطالعه گزارش شده است که بتن پر مقاومت به‌مراتب رفتار بهتری را در مقایسه با بتن نرمال در شرایط سیکل‌های تر و خشک از خود نشان داده‌اند و بتن پر مقاومت با الیاف ST بیشترین مقاومت فشاری و کششی و بتن پر مقاومت با الیاف ترکیبی PP-ST بیشترین اثرگذاری در کاهش نرخ جمع‌شدگی بتن پر مقاومت از خود نشان می‌دهد.

۲. برنامه آزمایشگاهی:

در این مطالعه، چهار نوع بتن: یعنی بتن معمولی (N)، بتن با ۱ درصد حجمی الیاف فلزی (ST) و بتن با ۰,۳ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن (PP) و بتن با ترکیب الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن به ترتیب ۰,۷ و ۰,۳ درصد، در آزمایشگاه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) ساخته و آزمایش شدند. آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش شامل آزمون مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جمع‌شدگی بود. در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی سیکل‌های تر و خشک، مخازنی طراحی و ساخته شدند و آزمایش‌های فوق برای تمامی نمونه‌ها پس از ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز قرارگیری در این مخازن انجام و با نتایج نمونه‌های مرجع مقایسه شدند تا تأثیر قرارگیری در معرض این سیکل‌ها بر مشخصات نمونه‌ها روشن شود. شکل ۱ تصویر تعدادی از نمونه‌های ساخته‌شده برای آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تصویر تعدادی از نمونه‌ها

۱,۲. مشخصات مصالح مصرفی

درشت‌دانه به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها از نوع شکسته است و ریزدانه به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها از نوع ماسه دو شور است. شن مورد استفاده در آزمایش‌های این مطالعه از نوع سنگدانه آهکی بوده و حداکثر سنگدانه به‌کاررفته ۱۹ میلی‌متر بود. مدول نرمی ریزدانه به‌کاررفته در این مطالعه ۲/۸ بود.

¹ Brucite

سیمان مورد استفاده در این مطالعه از نوع تیپ ۲ معمولی بوده و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. الیاف فلزی استفاده شده از نوع دو سر هوک به طول ۳۵ میلی‌متر و قطر ۱٫۵ میلی‌متر با مقاومت کششی ۱۰۵۰ مگا پاسکال است. الیاف پ پ به طول ۱۲ میلی‌متر و قطر ۰٫۲۲ میلی‌متر با مقاومت کششی ۳۸۰ مگا پاسکال است (شکل ۲). برای دستیابی به اثر سیکل‌های تر و خشک و تغییر در نوع الیاف بر مشخصات بتن، نمونه‌های مورد استفاده با یک طرح اختلاط و با شرایط یکسان آماده و عمل‌آوری شده‌اند. جدول ۲ طرح اختلاط و مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده بتن مورد استفاده در این مطالعه را نشان داده است. به منظور اختلاط مصالح نیز از آب شرب شهر قزوین استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات الیاف مصرفی

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

جدول ۲ آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

Chemical Properties (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Other	Total
		۲۰٫۲۴	۵٫۲۸	۳٫۷۲	۶۳٫۲۴	۲٫۶۹	۰٫۲۵	۰٫۵۳	۲٫۵۴	۱٫۴۹
Mineralogy (%)	C3S			C2S		C3A		C4AF		
	۵۲٫۶۷			۱۹٫۸۹		۶٫۰۹		۱۱٫۴۷		
Compressive Strength (MPa)	2 (Day)		3 (Day)		7 (Day)		28 (Day)			
	۱۶٫۱		۲۳٫۶		۳۱٫۹		۵۰			
	Fineness (cm^2/gr)			Autoclave Expansion (%)			Setting Time (min)			
	۳۱۶۵			۰٫۱۷			Initial		Final	
							۱۸۶		۲۷۶	

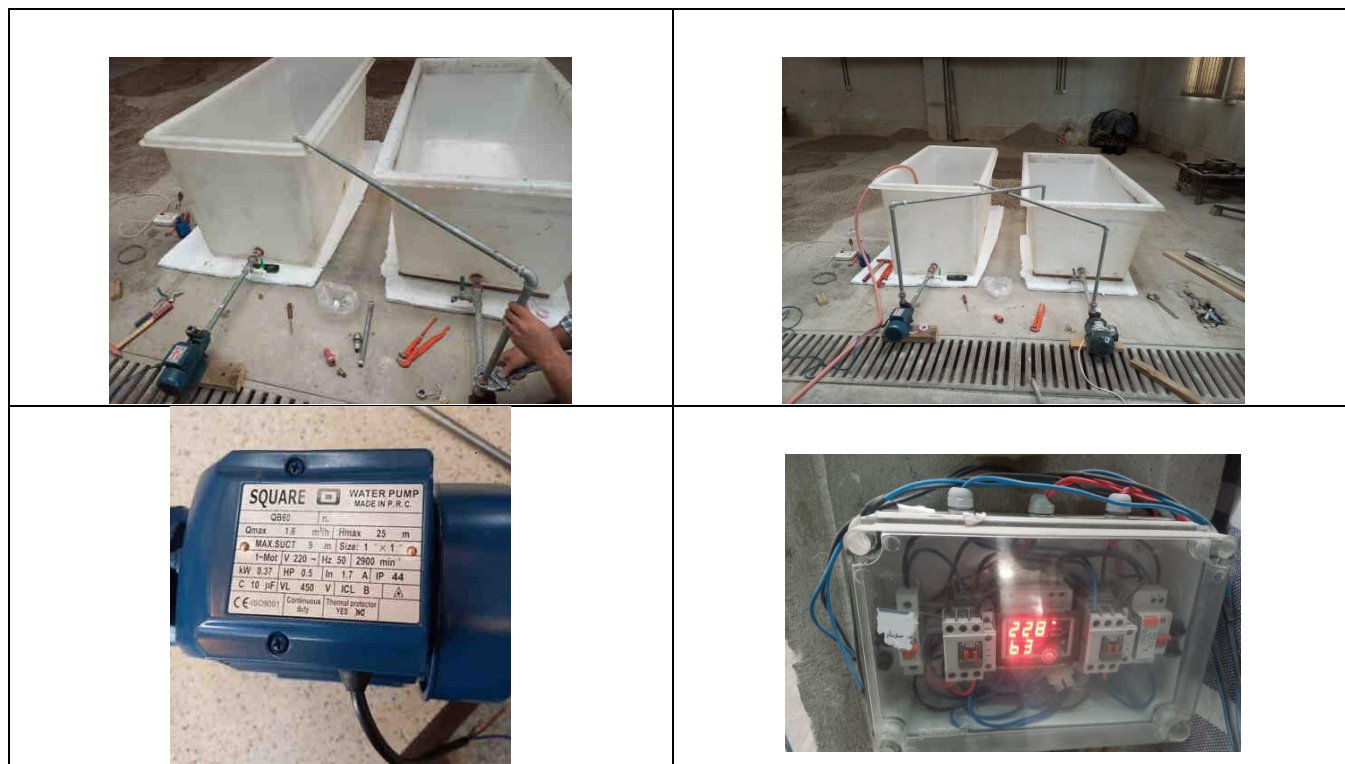
۲.۲. جزئیات طرح اختلاط و تجهیزات

به منظور اختلاط کامل اجزای بتن، شن، ماسه و الیاف به مدت یک دقیقه در همزن مخلوط شدند. در ادامه نصف آب و نصف سیمان و پس از آن تمام مخلوط سیمان با باقیمانده آب به همزن اضافه و همزن به مدت ۳ دقیقه کار کرد. پس از اختلاط کامل و تولید یک مخلوط همگن، بتن به داخل قالب ریخته شده و توسط میز لرزان متراکم گردید. جدول ۳ طرح اختلاط نمونه‌های مطالعه شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. اسلامپ نمونه‌های بر اساس استاندارد (ASTM C143) تعیین گردید و برای نمونه‌های *ST*, *HS*, *N*، *PP* و *ST-PP* به ترتیب ۵۰، ۳۵، ۳۰ و ۱۷ میلی‌متر بود.

جدول ۳ جزئیات اختلاط نمونه‌ها

نوع بتن	سیمان Kg/m ³	آب Kg/m ³	شن Kg/m ³	ماسه Kg/m ³	میکرو سلیس Kg/m ³	فوق روان کننده Kg/m ³	الیاف %PP	الیاف ST%	نسبت آب به سیمان
بتن نرمال (N)	۴۴۰	۲۲۵	۹۲۲	۹۲۲	۰	۰	۰	۰	۰.۵۱
پر مقاومت (HS)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳.۶	۰	۰	۰.۲۴
پر مقاومت با الیاف ST (HS-ST)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳.۶	۱	۰	۰.۲۴
پر مقاومت با الیاف PP (HS-PP)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳.۶	۰.۳	۰	۰.۲۴
پر مقاومت با الیاف PP و ST (HS-PP-ST)	۶۷۵	۱۶۵	۸۵۰	۷۰۰	۱۵۰	۱۳.۶	۰.۳	۰.۷	۰.۲۴

پس از ۲۴ ساعت بتن‌ها از قالب درآورده شده 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 موردنظر آزمایش شوند. شبیه‌سازی سیکل‌های تر و خشک توسط ۲ مخزن آب، ۲ پمپ و یک تایمر برای فعال‌سازی خودکار پمپ‌ها در زمان موردنظر به همراه لوله‌کشی موردنیاز طراحی و ساخته شد. شکل ۳ تجهیزات شبیه‌سازی سیکل‌تر و خشک را نشان می‌دهد. زمان شبیه‌سازی شده برای تکمیل یک سیکل‌تر و خشک طبق گزارش‌های آب و هوایی اسکله بندر امام خمینی در خلیج فارس هر ۶ ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: تجهیزات شبیه‌سازی سیکل تر و خشک شامل، پمپ‌ها، لوله‌کشی، مخازن و تابلو برق تنظیم‌کننده سیکل

نمونه آب اسکله امام خمینی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه آن طبق گزارش جدول ۴ ارائه شد. در این آزمایش‌ها، کلر به روش مور^۲، سولفات به روش گراویمتری و منیزیم به روش *Atomic Absorption Spectrophotometry (A.A.S)* سنجیده شده است. برای شبیه‌سازی این آب در آزمایشگاه از سولفات منیزیم استفاده شد. به این منظور در هر لیتر آب، مقدار ۳،۷۸ گرم از سولفات منیزیم خشک اضافه شده است. با توجه به بررسی مخازن حاوی سولفات منیزیم، پس از یک ماه مشاهده شد که آب مخزن خواص اولیه خود را از دست داده‌اند که یکی از دلایل آن جذب سولفات منیزیم توسط نمونه‌ها می‌باشد. جدول ۵ نتایج آزمایش بر روی آب حاوی سولفات منیزیم پس از یک ماه نشان می‌دهد. همان‌طور که از جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود مقادیر سولفات و منیزیم در آزمایش آب بندر به ترتیب 3020 ppm و 1600 ppm بوده است درحالی‌که پس از گذشت یک ماه، این مقادیر به 1650 ppm و 320 ppm کاهش یافته است. از آنجایی این مقادیر کاهش یافته متوازن نبوده‌اند و امکان اضافه کردن مقادیر مشخص و دقیق از سولفات منیزیم وجود نداشت، بنابراین برای حفظ شرایط واقعی آب خلیج فارس، آب مخازن برای نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش پس از یک ماه کاملاً تخلیه و سولفات منیزیم مجدد به آب اضافه شد و تا انتهای مطالعه هرماه این تخلیه و پر کردن مجدد مخازن صورت گرفت. همچنین به منظور ثابت نگه داشتن غلظت آب دارای سولفات منیزیم در حجم ثابتی از آب، سطح آب مخازن علامت‌گذاری شده و طی روز و هفته کنترل شده است. نمونه‌ها پس از سپری کردن سیکل‌های موردنظر از مخزن خارج شده و در زیر جک فشاری با ظرفیت 3000 کیلو نیوتون قرار گرفته است.

² Mohr

جدول ۴: مشخصات شیمیایی آب خلیج فارس

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

جدول ۵: مشخصات شیمیایی آب شبیه سازی شده پس از یک ماه

سولفات	۱۶۵۰ ppm
منیزیم	۳۲۰ ppm

۳,۲. آزمایشات مشخصات مکانیکی

۱,۳,۲. آزمون مقاومت فشاری

در این مطالعه برای تعیین مقاومت فشاری، بر اساس استاندارد (Committee, 2014) *ACI318-14* از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی متری استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری پس از گذراندن تعداد ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۶۰ سیکل در دمای محیط 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 و ارتفاع ۲۰ سانتی متر و بر اساس استاندارد *ASTM C496* انجام شده است (Test et al., 2017). آزمایش مقاومت کششی و پس از گذراندن تعداد ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۶۰ سیکل در دمای محیط انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش ارائه شده است.

۳,۳,۲. تست جمع شدگی^۳:

برای به دست آوردن میزان جمع شدگی نمونه‌ها از استانداردهای *ASTM C157-2009* (Method, 2009) و *ASTM C490-2012* (Cabinets et al., 2012) استفاده شده است. برای هر مخلوط ۳ نمونه آزمایش جمع شدگی ساخته شده است و میانگین نتایج ارائه شده است. نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه و پس از سیکل‌های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ نتایج ارائه شده است. شکل ۴ نمونه و تجهیزات استفاده شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد.

³ Shrinkage

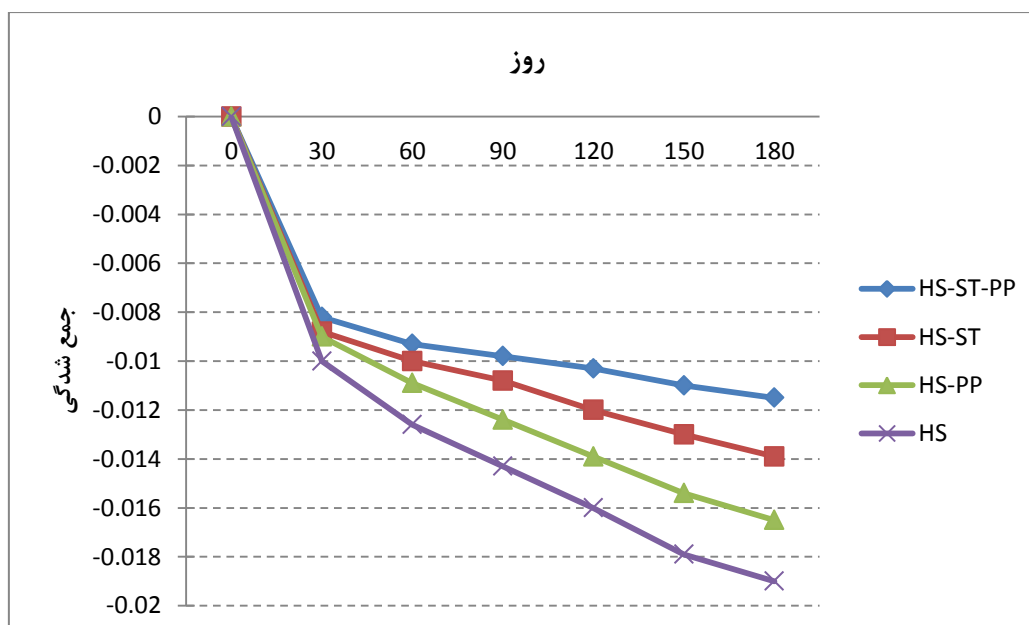


شکل ۳: تصویری از دستگاه جمع شدگی و نحوه قرار دادن نمونه

۳. بحث و نتیجه‌گیری:

۱.۳. جمع شدگی:

از آنجایی جمع شدگی بتن باعث ایجاد ترک‌ها و به دنبال آن اثرات مخرب روی خواص مکانیکی و کاربری بتن به‌خصوص در شرایط محیطی ویژه می‌شود، به‌عنوان بخشی از مطالعه حاضر به تجزیه و تحلیل میزان تأثیر سیکل‌های تر و خشک در آب حاوی سولفات منیزیم بر میزان جمع شدگی بتن‌های تحت مطالعه‌ی *HS*، *HS-ST*، *HS-PP* و *HS-PP-ST* پرداخته شده است، همچنین بررسی این نکته که کدام‌یک از الیاف‌های مذکور می‌تواند بهتر در این شرایط پاسخگو بوده و جمع شدگی کمتری را به خود اختصاص دهد. تغییرات نتایج آزمون جمع شدگی بر روی نمونه‌های بتن‌های الیافی و بتن پر مقاومت مطابق با استانداردهای مربوطه در شکل ۵ ارائه شده است.

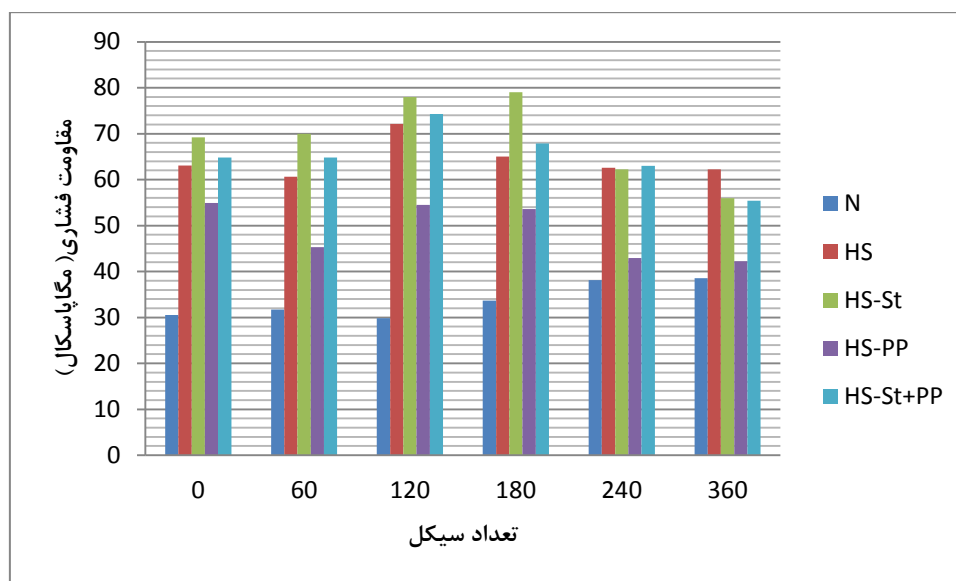


شکل ۵: روند تغییرات جمع شدگی نمونه‌ها

با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که مقدار جمع شدگی نمونه‌های *HS-ST-PP* و *HS-ST,HS-PP,HS* پس از ۳۰ روز قرارگیری در سیکل‌های تر و خشک به ترتیب ۰,۰۰۸۲ و ۰,۰۰۹، ۰,۰۰۸۸، ۰,۰۰۱ می‌باشد که قرارگیری آن‌ها در معرض سیکل‌های بیشتر نرخ افزایش جمع شدگی را افزایش داده به طوری که مقدار جمع شدگی این نمونه‌ها پس از ۱۸۰ روزه ترتیب ۹۰، ۵۸، ۸۳ و ۴۰ درصد افزایش داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد بتن‌های حاوی الیاف ترکیبی فلزی و پلی‌پروپیلن در اثر قرارگیری در معرض سیکل‌های تر و خشک نسبت به سایر طرح‌های بررسی شده در این مطالعه پایدارتر بوده و این سیکل‌ها تأثیر کمتری را برافزایش جمع شدگی داشته است. از طرفی دیگر مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار جمع شدگی در معرض سیکل‌های تر و خشک در تمامی سیکل‌ها مرتبط با بتن پر مقاومت است. حضور میکرو سیلیس در بتن‌های پر مقاومت، مقدار بالای سیمان و نسبت آب به سیمان پایین نرخ حرارتی بالایی در بتن ایجاد کرده که باعث ایجاد اختلاف دمای داخل و خارج بتن شده که افزایش جمع شدگی را نتیجه می‌دهد (Pan & Meng, 2016) (Shen et al., 2019). علاوه بر این حضور میکرو سیلیس نیز هنگام واکنش‌های هیدراتاسیون حرارت زیادی را ایجاد کرده و باعث ایجاد پدیده جمع شدگی خود به خودی می‌شود (Mazloom et al., 2004). افزودن الیاف به بتن پر مقاومت در تمامی سیکل‌ها کاهش جمع شدگی را نتیجه داده است. در سیکل‌های بررسی شده بهترین عملکرد در کاهش میزان جمع شدگی در اثر افزودن الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن به طور هم‌زمان بوده است. به طوری که به طور متوسط در سیکل‌های بررسی شده میزان جمع شدگی نمونه‌های *HS-ST,PP* و *HS-PP* در مقایسه با نمونه *HS* به ترتیب ۳۳، ۲۴ و ۱۳ درصد بوده است که این نتایج عملکرد مثبت الیاف در کاهش جمع شدگی را نشان می‌دهد. حضور الیاف در بتن باعث حفظ انسجام بتن و جلوگیری از تغییر شکل نمونه‌ها شده که کاهش جمع شدگی را نتیجه داده است.

۲,۳. مقاومت فشاری:

روند تغییرات 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 شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: تأثیر سیکل‌های تر و خشک بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود بتن نرمال در میان نمونه‌های بررسی شده کمترین مقاومت فشاری را داشته است. بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های نرمال در اثر قرارگیری در سیکل‌های تر و خشک نشان می‌دهد تا ۱۲۰ سیکل تغییرات قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن نرمال ایجاد نشد. این در حالی بود که پس از ۱۲۰ سیکل تا ۲۴۰ سیکل مقاومت فشاری این نمونه‌ها حدود ۱۳ درصد افزایش داشته و پس از ۲۴۰ سیکل تا ۳۶۰ سیکل تغییرات محسوسی نداشته است. در رابطه با نمونه‌های پر مقاومت نیز مشاهده شده است که قرارگیری بتن‌های پر مقاومت در معرض تا ۶۰ سیکل تغییرات قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن نداشته است. قرارگیری این نمونه‌ها تا ۱۲۰ سیکل مقاومت فشاری را نسبت به بتن پر مقاومتی که در معرض سیکل‌های تر و خشک قرار نگرفته است ۱۴ درصد افزایش داده است. در رابطه با نمونه‌هایی که مدت بیشتری در معرض سیکل‌های تر و خشک قرار گرفتند (۱۸۰ و ۲۴۰ سیکل) مقاومت فشاری بتن کاهش یافته ولی باز هم نسبت به بتن پر مقاومتی که سیکل‌های تر و خشک را تجربه نکرده است افت قابل توجهی نداشته است. روند افزایش مقاومت در مطالعات گذشته نیز دیده شده است به طوری که در مطالعه‌ی ژو و همکاران 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 (Zhou et al., 2015). در سال ۲۰۲۰ سان و همکاران بتن با شکل‌پذیری بالا را در محیط‌های سولفاته مختلف را مورد ارزیابی قرار داده‌اند، این روند افزایشی مقاومت فشاری تا حدود ۶۰ سیکل ادامه داشته و سپس روند کاهشی دیده شده است (Li & Shi, 2021). در پژوهشی دیگر نیز این روند افزایشی و سپس کاهشی در مورد این نوع بتن دیده شده است (X. Guo & Xiong, 2021). در مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های پر مقاومت و نرمال نیز مشاهده می‌شود که متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها پر مقاومت در حدود ۱۰۰ درصد بیشتر از مقاومت فشاری بتن نرمال بوده است.

بررسی اثرات مسلح کردن بتن‌های پر مقاومت با الیاف نتایج نشان می‌دهد که در حالت‌های مختلف به کارگیری الیاف، بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت فشاری بتن در حضور الیاف فلزی داشته‌اند. در مقایسه بتن پر مقاومت و بتن پر مقاومت حاوی ۱ درصد از الیاف فلزی که در معرض سیکل‌های تر و خشک قرار نگرفتند، مقاومت فشاری بتن حدود ۱۰ درصد افزایش داشته است. قرار گرفتن بتن‌های (HS-St) پس از ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ سیکل افزایش مقاومت فشاری بتن را تجربه کرده است. به طوری که این نمونه‌ها پس از ۱۲۰ سیکل، ۱۴ درصد افزایش در مقاومت فشاری داشته است. واکنش یون منیزیم با یون‌های هیدوکسیل

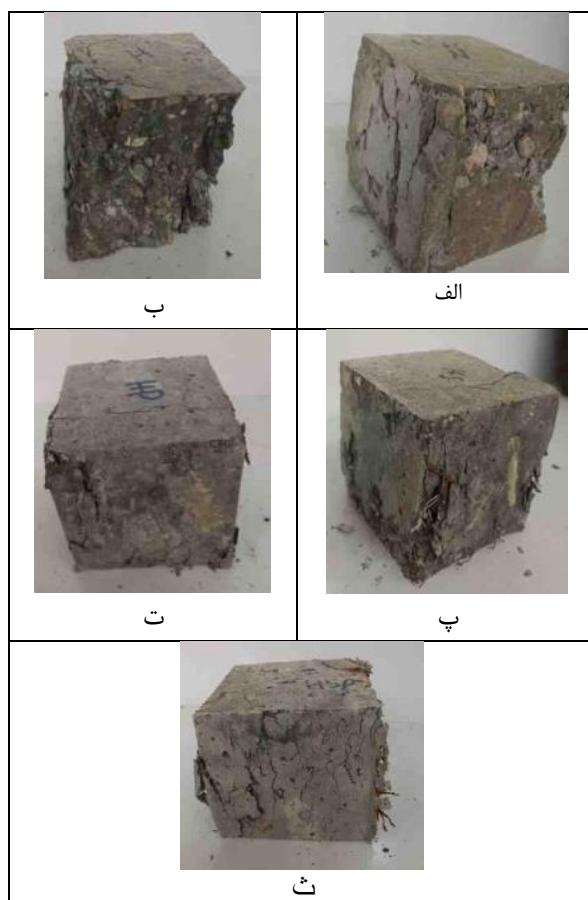
باعث تولید بروسیت^۴ شده یا اینکه منیزیم جایگزین کلسیم در هیدرات کلسیم سیلیکات می‌شود. طی این واکنش‌ها تولیدات حاصله منافذ داخلی بتن را پر کرده، از این‌روی بتن را متراکم و تا حدودی مقاومت بتن بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، بالاتر بودن مقاومت فشاری ($HS-St$) در مقایسه با (HS) در تمام سیکل‌ها دیده شده است به طوری که به طور متوسط در مقایسه با بتن پر مقاومت در سیکل‌های بررسی شده ۱۴ درصد افزایش مقاومت داشته است. الیاف فولادی به دلیل ایجاد پیوستگی بهتر از رشد ترک‌ها جلوگیری کرده و موجب بهبود مقاومت فشاری شده است. به دلیل بالاتر بودن مقاومت کششی و مدول الاستیسیته الیاف فلزی در مقایسه با الیاف PP ، نمونه ($HS-St$) در مقایسه با بتن پر مقاومت و بتن پر مقاومت با الیاف PP دارای خواص مکانیکی بهتری است.

پس از نمونه حاوی الیاف فلزی که بیشترین بهبود را در مقاومت فشاری بتن پر مقاومت داشته است، نمونه هیبریدی که حاوی ۰,۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰,۷ درصد الیاف فلزی بود نیز مقاومت فشاری بتن پر مقاومت را بهبود داده است. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه ($HS-St+PP$) در مقایسه با بتن پر مقاومت ۲,۸ درصد بیشتر بوده است. پس از قرارگیری در ۶۰ و ۱۲۰ سیکل نیز مقاومت فشاری نمونه هیبریدی در مقایسه با بتن پر مقاومت به ترتیب ۶,۹ و ۳,۰۵ درصد بیشتر بوده است. اثرگذاری کمتر نمونه هیبریدی در مقایسه با نمونه حاوی الیاف فلزی را می‌توان به درصد کمتر الیاف فلزی مرتبط دانست. در واقع الیاف فولادی به دلیل مدول الاستیسیته بالا شده مانع گسترش و رشد ترک‌ها می‌گردند و از طرفی دیگر اثر ترک‌های اولیه را می‌توان با استفاده از الیاف PP کاهش داد (Deng et al., 2020) (H. Guo et al., 2021). در نتیجه مقاومت نمونه‌هایی با الیاف هیبرید از بتن پر مقاومت بدون الیاف و از بتن پر مقاومت با الیاف بیشتر است. تأثیر مثبت الیاف هیبریدی بر مقاومت فشاری بتن در مطالعات اسلانی نیز مشاهده شده است (Aslani & Nejadi, 2013). روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های هیبریدی نیز مشابه با نمونه‌های الیافی دیگر بود، به طوری که پس از ۶۰ سیکل در ابتدا مقاومت فشاری تغییر محسوس نداشته و پس از آن تا ۱۲۰ سیکل مقاومت فشاری افزایش داشته و تقریباً به مقاومت فشاری نمونه مرجع هیبریدی رسیده است. این در حالی است که بعد از ۱۲۰ سیکل، روند تغییرات مقاومت فشاری نزولی بوده است.

در میان نمونه‌های بررسی شده، نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی ۰,۳ درصد حجمی از الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با بتن پر مقاومت، مقاومت فشاری کمتری را تجربه کرده است. افزودن ۰,۳ درصد حجمی از این الیاف مقاومت فشاری بتن پر مقاومت را ۱۳ درصد کاهش داده است. تأثیر منفی این الیاف بر مقاومت فشاری بتن‌های پر مقاومت در سیکل‌های تر و خشک نیز مشاهده است. این روند به نحوی است که مقاومت فشاری نمونه ($HS-PP$) در مقایسه با (HS)، پس از ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ سیکل به ترتیب ۱۲,۲، ۲۴,۴۱ و ۱۷,۵۳ درصد کاهش داشته است. یکی از عوامل مهم بر کسب مقاومت فشاری بتن، تراکم بتن است. کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن موجب کاهش کارایی و در نهایت عدم تراکم کامل می‌شود. این موضوع را می‌توان به عنوان یکی از عوامل کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن برشمرد. از طرف دیگر در اثر افزودن الیاف به بتن پدیده‌ای به نام خاصیت توپی شدن الیاف ممکن است به وقوع بپیوندد. در این حالت از یک طرف خاصیت توپی شدن موجب ایجاد انفصال ساختار بتن و از طرفی موجب تمرکز تنش شده که شکست زود هنگام بتن را حاصل می‌شود (Afroughsabet et al., 2018) (Afroughsabet & Ozbakkaloglu, 2015). بتن‌های حاوی الیاف پ پ در مقایسه با بتن‌های حاوی الیاف فلزی مقاومت فشاری کمتری را نشان می‌دهد. این نتیجه در مطالعه افروغ ثابت نیز دیده شده است و دلیل آن را می‌توان

⁴ Brucite

پایین بودن مقاومت و مدول الاستیسته الیاف *PP* در مقایسه با الیاف *ST* دانست (Afroughsabet & Ozbakkaloglu, 2015).



شکل ۷: مود شکست نمونه‌های مکعبی. الف) بتن نرمال، ب) بتن پر مقاومت بدون الیاف، پ) بتن پر مقاومت با الیاف فولادی، ت) بتن پر مقاومت با الیاف پ، پ) بتن پر مقاومت با الیاف پ و استیل

در رابطه با نحوه شکست نمونه‌ها در شکل ۷ دیده می‌شود که بتن *HS* دارای مد شکست ترد هست، در حالی که در بتن نرمال این مد شکست شکل پذیر هست، در مورد بتن‌های *HS-PP*، *HS-ST*، *HS-ST-PP*، *HS-ST-PP-PP* شکست شکل پذیر دیده می‌شود، در واقع مطابق با مطالعه هانا وی و همکاران چنین در رفتاری در بتن *UHPC* نیز دیده شده است، به صورتی که این بتن دارای یک نزول سریع‌تری در منحنی تنش و کرنش در فشار هست، این کاهش سریع در مقاومت فشاری در ناحیه‌ی بارگذاری پس نقطه اوج^۵ یک مد شکست ترد را حاصل می‌شود و همان‌طور که در تصاویر مشخص است بیان شده که به‌منظور بهبود شکل‌پذیری بدون کاهش در مقاومت اضافه کردن الیاف یک راهکار محبوب به شمار می‌آید، بتن *HS* پس از ترک خوردن به راحتی از هم جدا شده و دارای یک شکست ناگهانی است ولی بتن *HS-PP-ST* این جدایی را تجربه نکرده است، در واقع مد شکست شکل پذیر^۶ ظرفیت جذب انرژی بتن‌های حاوی الیاف را نشان می‌دهد (Hannawi et al., 2016) (Afroughsabet et al., 2016) (J. Yang et al., 2021).

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بتن‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن انعطاف‌پذیری بیشتر و ریزش کمتری را در مقایسه با بتن *HS* و *HS* با الیاف فولادی رادارند و همان‌طور که در مطالعه پاکروان و همکاران بیان شده تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن

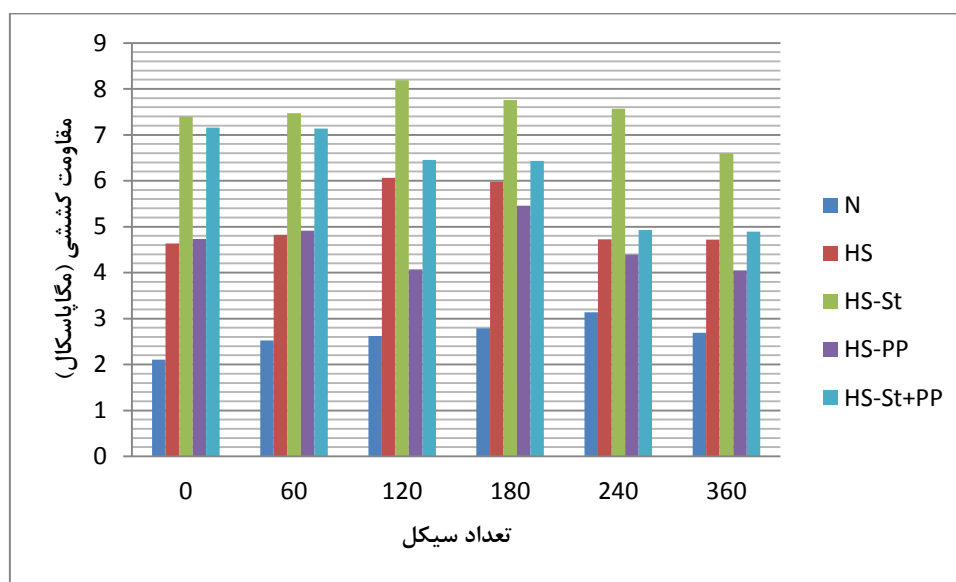
⁵ Post-Peak Load

⁶ Ductile

روی شکل‌پذیری به دلیل مقاومت پایین در مقایسه با الیاف فولادی که مقاومت و مدول الاستیسیته بالایی دارد بیشتر است که این امر در بازدید نمونه‌ها نیز مشهود بوده است (Pakravan et al., 2017).

۳.۳. مقاومت کششی:

روند تغییرات 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 شکل ۸ ارائه شده است.

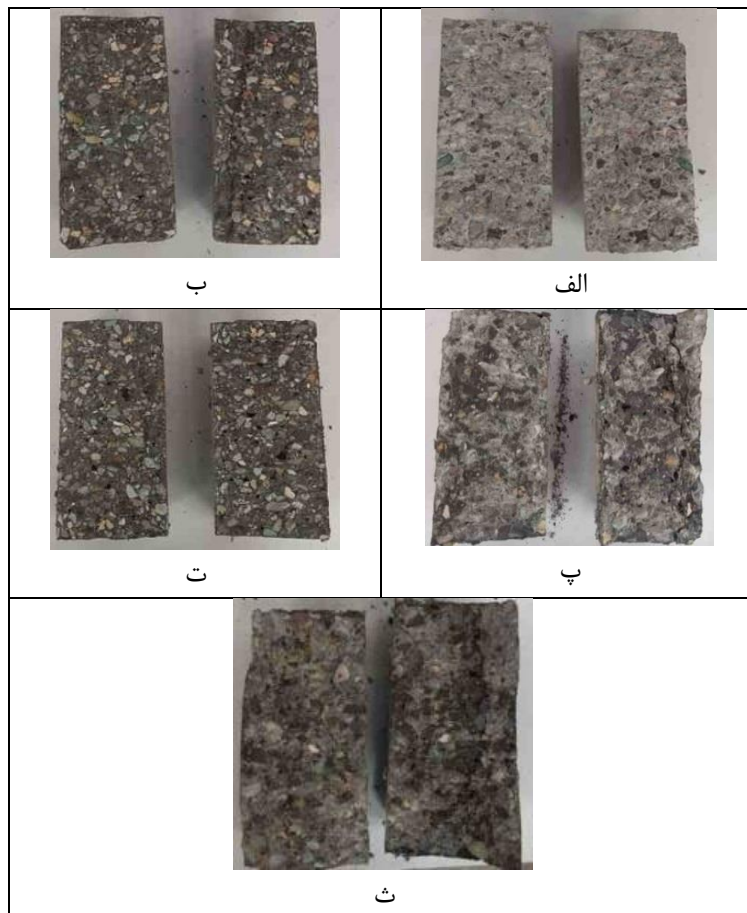


شکل ۸: روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها

نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقاومت کششی به دست آمده مرتبط با نمونه‌های نرمال است. در این نمونه‌ها مشاهده شده است که قرار گرفتن بتن‌های نرمال در معرض سیکل‌های تر و خشک باعث افزایش در مقاومت کششی بتن نرمال شده است به طوری که پس از ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ سیکل، مقاومت کششی نمونه N به ترتیب ۳۲،۵۴، ۴۸،۹۳ و ۲۷،۷۹ درصد افزایش داشته است. از طرف دیگر مقاومت کششی نمونه‌های پر مقاومت در مقایسه با بتن معمولی ۱۲۰ درصد بیشتر بوده است. افزودن میکرو سیلیس باعث بهبود ریزساختار بتن و در نهایت افزایش مقاومت کششی بتن شده است. قرارگیری بتن پر مقاومت در معرض سیکل‌های تر و خشک نشان می‌دهد که پس از یک‌روند افزایش در مقاومت کششی بتن تا عددی بین ۱۲۰ تا ۱۸۰ سیکل روند نزولی شروع می‌شود. در رابطه با مقاومت کششی بتن‌های پر مقاومت نیز مشابه با مقاومت فشاری بتن مشاهده می‌شود که پس از قرار گرفتن در ۳۶۰ سیکل مقاومت کششی بتن پر مقاومت در مقایسه با نمونه پر مقاومت مرجع تغییرات چندانی نداشته است. به طوری که مقاومت کششی بتن پر مقاومت پس از ۳۶۰ سیکل ۴،۷۲ مگا پاسکال بوده و مقاومت کششی بتن پر مقاومت مرجع ۴،۶۳ مگا پاسکال بود. ورود تولیدات حاصل از ترکیبات شیمیایی در منافذ بتن و واکنش شیمیایی بین یون‌های سولفات و تولیدات هیدراتاسیون منجر به متراکم شدن آن‌ها می‌شود، اما مقدار بیش از حد این تولیدات باعث ترک‌هایی در نمونه‌ها شده و به دنبال آن این ترک‌ها گسترش یافته ترک‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند که علاوه بر تضعیف مقاومت بتن منجر به نفوذپذیری

بیشتر برای انتقال یون‌های مخرب و در نهایت تشدید خرابی خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت کششی می‌شود. همان‌طور در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تغییرات خواص مکانیکی بتن در ۳ فاز طی می‌شود، فاز اول روند صعودی، فاز دوم فازی است که بالا پایین شدن‌هایی در مقاومت کششی مشاهده می‌شود و در نهایت روند نزولی مقاومت کششی دیده می‌شود که همسو با نتایج مطالعات گذشته نیز است (Attack, 2019) (Usman Rashid, 2020). با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که افزودن الیاف در بتن باعث بهبود مقاومت کششی بتن می‌شود. حضور الیاف در بتن از گسترش ترک‌های مویین جلوگیری کرده و افزایش مقاومت کششی را حاصل می‌شود. از طرف دیگر الیاف باعث تأخیر در تشکیل ترک‌های کششی شده و باعث افزایش مقاومت کششی می‌شوند. در هنگام دونیم شدن نمونه بتنی در آزمون مقاومت کششی، الیاف موجب انتقال تنش‌ها از ماتریس سیمان به الیاف می‌شود که در مقایسه با بتن معمولی تنش‌های کششی بیشتری تحمل می‌گردد. این موضوع را می‌توان توجیهی بر بهبود مشخصات مقاومت کششی بتن در حضور الیاف دانست.

مشابه با نتایج تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری بتن، در رابطه با مقاومت کششی نیز بیشترین تأثیر بر بهبود مقاومت کششی در اثر افزودن ۱ درصد حجمی از الیاف فلزی بر بتن پر مقاومت مشاهده شد. یکی از دلایل بیشتر بودن مقاومت کششی الیاف فلزی در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن را می‌توان به خاصیت پیوند بیشتر این الیاف به خاطر شکل ظاهری آن مرتبط دانست. این پدیده در تمامی سیکل‌ها نیز حاکم بود به طوری که مقاومت کششی نمونه $HS-St$ در مقایسه با نمونه HS در سیکل‌های ۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ به ترتیب ۵۹،۵۸، ۵۴،۸۷، ۳۵ و ۶۰،۲۱ درصد افزایش داشته است. این افزایش مقاومت در مطالعات پیشین نیز دیده شده است (Song & Hwang, 2004) (Sciarretta et al., 2021) (Hussain et al., 2022). این افزایش مقاومت کششی می‌تواند به دلیل توزیع یکنواخت تنش‌های کششی و جلوگیری از رشد ترک‌های بتن باشد، که ناشی از حضور الیاف و مقاومت کششی است. برخی از مطالعات گزارش کرده‌اند که اثر مقاومت در برابر ترک الیاف فولادی اساساً منجر به جلوگیری از رشد ترک می‌شود که موجب شده بتن در یک مقاومت معین نگه‌داشته و توانایی تغییر شکل را پس از ترک خوردن داشته باشد، از سوی دیگر یک مقدار مناسب الیاف فولادی می‌تواند باعث ایجاد یک سیستم انتقال نیروی خوب شود (Junwei et al., 2021) (H. Guo et al., 2021) (Kim & Yoo, 2019) (Choi et al., 2019). کمترین اثرگذاری در بهبود مقاومت کششی بتن متعلق به نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بوده است. نتایج آزمون مقاومت کششی نشان می‌دهد که افزودن این نوع الیاف بر بتن پر مقاومت در نمونه مرجع و پس از ۶۰ سیکل، تأثیر جزئی بر مقاومت کششی داشته است. یکی از عوامل کسب مقاومت کششی بتن در حضور الیاف، حفظ ساختار بتن به خاطر خاصیت باندینگ آن‌ها است. مکانیسم اصلی تأثیرگذار بر مشخصه باندینگ الیاف شامل چسبندگی سطحی و پیوند مکانیکی است. کمتر بودن مقاومت فشاری نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با نمونه دارای الیاف فلزی به شکل و جنس آن‌ها مرتبط است. الیاف پلی‌پروپیلن سطحی کمتری در مقایسه با الیاف فلزی داشته و فاقد خاصیت پیوند مکانیکی می‌باشند. پایین‌تر بودن مقاومت کششی الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با الیاف فلزی، سطح صاف و طول کوتاه این الیاف یکی از دلایل این موضوع است. این در حالی است که پس از قرارگیری در سیکل‌های بیشتر، عملکرد مطلوب این الیاف از بین رفته و حتی کاهش مقاومت کششی نیز دیده شده است. اثر سیکل‌های تر و خشک بر ریزساختار بتن موجب کاهش مشخصات پیوند الیاف شده که در نهایت کاهش مقاومت کششی را نتیجه داده است. بیشترین افت مقاومت کششی در مقایسه با بتن پر مقاومت پس از ۱۲۰ سیکل بوده و قرارگیری در معرض سیکل‌های بیشتر عملکرد بتن‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را بهبود داده و رفتار این نمونه‌ها تقریباً مشابه با بتن پر مقاومت شده است. شکل ۹ تصاویر از نحوه شکست نمونه‌های کششی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: مد شکست نمونه‌های استوانه‌ای تحت آزمایش کششی. الف) بتن نرمال، ب) بتن پر مقاومت بدون الیاف، پ) بتن پر مقاومت با الیاف فولادی، ت) بتن پر مقاومت با الیاف پ پ، ث) بتن پر مقاومت با الیاف استیل و پ پ

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری، کششی و جمع شدگی بتن معمولی، بتن پر مقاومت بدون الیاف و بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف فلزی، پلی‌پروپیلن و ترکیبی پس از گذراندن ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ سیکل متوالی‌تر و خشک در آب حاوی سولفات منیزیم شبیه‌سازی شده بندر امام خمینی بررسی شد. ارزیابی‌های آزمایشگاهی انجام شده در این مطالعه به ما امکان می‌دهد تا نتیجه‌های زیر را به دست آوریم:

بتن‌های پر مقاومت (*HS*) در مقایسه با بتن نرمال (*N*) در شرایط سیکل‌های تر و خشک رفتار بهتری را نشان می‌دهد. در میان بتن‌های پر مقاومت مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن، فولادی و ترکیبی پلی‌پروپیلن و فولادی، بتن حاوی الیاف فولادی به دلیل خصوصیات مکانیکی، خاصیت پیوند و شکل ظاهری الیاف که به صورت دو سر هوک هستند در مقایسه با الیاف پ پ عملکرد بهتری در بهبود خواص مکانیکی از خود نشان داده است. از سوی دیگر، الیاف *PP* به دلیل عدم توزیع یکنواخت الیاف *PP* در بتن و ایجاد پدیده‌ی توپی شدن موجب کاهش خواص مکانیکی بتن‌های پر مقاومت شده است. این روند به نحوی است

که مقاومت فشاری نمونه (HS-PP) در مقایسه با (HS)، پس از ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ سیکل به ترتیب ۱۲،۲، ۲۴،۴۱ و ۱۷،۵۳ درصد کاهش داشته است.

در روند تغییرات مقاومت فشاری و کششی رفتار کلی نمونه‌ها را می‌توان به سه فاز تقسیم کرد به طوری که در فاز افزایش در مقاومت دیده شده است این روند در فاز دوم شاهد نوساناتی در مقاومت بوده است و پس از سن ۱۲۰ روز کلیه بتن‌ها شاهد کاهش در مقاومت بوده‌اند.

نتایج تست جمع شدگی نشان می‌دهد که بتن حاوی الیاف ترکیبی (HS-PP-ST) کمترین مقدار جمع شدگی را تجربه کرده است، در حالی که بتن پر مقاومت بدون الیاف بیشترین مقدار جمع شدگی را شاهد بوده است. به طور متوسط در سیکل‌های مورد بررسی میزان بهبود در نتایج جمع شدگی نمونه‌های HS-ST، HS-ST-PP و HS-PP در مقایسه با بتن HS به ترتیب ۳۳، ۲۴ و ۱۳ درصد بوده است که این نتایج عملکرد مثبت الیاف در کاهش جمع شدگی را نشان می‌دهد.

در آخر پیشنهاد می‌شود که برای بتن‌هایی که در معرض آب دریا تحت سیکل‌های متوالی خشک و تر هستند از بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف استفاده شود بخصوص استفاده ترکیبی الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی که در مجموع دارای خواص مکانیکی مطلوب‌تر و جمع شدگی کمتری است.

۵. مراجع

- Abaeian, R., Behbahani, H. P., & Moslem, S. J. (2018). *Effects of High Temperatures on Mechanical Behavior of High Strength Concrete Reinforced with High Performance Synthetic Macro Polypropylene (HPP) Fibres*. Elsevier Limited.
- Abdallah, S., Fan, M., Zhou, X., & Geyt, S. Le. (2016). Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 325–335. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0148-5>
- Abdi Moghadam, M., & Izadifard, R. A. (2020). Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 113(March), 102978. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102978>
- Abdi Moghadam, M., & Izadifard, R. A. (2021). Prediction of the Tensile Strength of Normal and Steel Fiber Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00485-6>
- Abdi Moghadam, M., Izadifard, R. A., & Khalighi, A. (2022). Microstructural and Mechanical Characteristics of Fiber-Reinforced Cementitious Composites under High-Temperature Exposure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(9), 4022208.
- Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Monteiro, P. J. M. (2018). The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering*, 139, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.047>

- Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). High-performance fiber-reinforced concrete: a review. In *Journal of Materials Science* (Vol. 51, Issue 14). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>
- Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). *Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers*. 94, 73–82.
- Aslani, F., & Nejadi, S. (2013). Composites : Part B Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers : Compressive and tensile strengths , moduli of elasticity and rupture , compressive stress – strain curve , and energy dissipated under compression. *Composites Part B*, 53, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.044>
- Attack, U. S. (2019). *Effect of Dry–Wet Ratio on Properties of Concrete Under Sulfate Attack*.
- Cabinets, M., Rooms, M., Mass, D., & Iron, A. (2012). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste , Mortar , and Concrete 1*. 11–15. <https://doi.org/10.1520/C0490>
- Chemrouk, M. (2015). The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete. *Procedia Engineering*, 125, 713–724. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.112>
- Choi, W. C., Jung, K. Y., Jang, S. J., & Yun, H. Do. (2019). The influence of steel fiber tensile strengths and aspect ratios on the fracture properties of high-strength concrete. *Materials*, 12(13), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma12132105>
- Clifton, J. R., Frohnsdorff, G., & Ferraris, C. (1998). Standards for evaluating susceptibility of cement based materials to ESA. In *Seminar on sulfate attack mechanism*.
- Committee, A. C. I. (2014). *No reproduction or networking permitted without license from IHS*.
- Deng, F., Xu, L., Chi, Y., Wu, F., & 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. *Composite Structures*, 252, 112685. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112685>
- Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 132, 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100>
- Fariad, A. S., Mostafa, S. A., Tayeh, B. A., & Tawfik, T. A. (2021). Mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporated with various nano waste materials under different curing conditions. *Journal of Building Engineering*, 43(December 2020), 102569. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102569>
- Feng, J., Sun, W. W., Wang, X. M., & Shi, X. Y. (2014). Mechanical analyses of hooked fiber pullout performance in ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.049>
- Feng, S., Xiao, H., & Geng, J. (2020). Bond strength between concrete substrate and repair mortar: Effect of fibre stiffness and substrate surface roughness. *Cement and Concrete*

- Composites*, 114, 103746. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103746>
- Guo, H., Jiang, L., Tao, J., Chen, Y., Zheng, Z., & Jia, B. (2021). Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness. *Construction and Building Materials*, 275, 122132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122132>
- Guo, X., & Xiong, G. (2021). Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*, 269(xxxx), 121326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121326>
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- Hong, L., Chen, Y. D., Li, T. D., Gao, P., & Sun, L. Z. (2020). Microstructure and bonding behavior of fiber-mortar interface in fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117235>
- Hussain, H. K., Zewair, M. S., & Ahmed, M. A. (2022). High Strength Concrete Beams Reinforced with Hooked Steel Fibers under Pure Torsion. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(1), 92–104. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-01-07>
- 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.
- Junwei, Z., Shijie, L., & Hongjian, P. (2021). Experimental investigation of multiscale hybrid fibres on the mechanical properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 299, 123895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123895>
- Kaish, A. B. M. A., Sahari, E. I., & Fong, N. L. (2020). Development of Self-compacting Fibre Reinforced Structural Mortar for Concrete Repair. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 713(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012030>
- Kim, J. J., & Yoo, D. Y. (2019). Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 103(April), 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006>
- Li, L., & Shi, J. (2021). *Experimental Study on Mechanical Properties of High-Ductility Concrete against Combined Sulfate Attack and Dry – Wet Cycles*. 1–15.
- Lu, X., & Hsu, C. T. (2006). *Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression*. 36, 1679–1685. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.021>
- Ma, Haiyan, Gong, W., Yu, H., & Sun, W. (2018). Durability of concrete subjected to dry-wet cycles in various types of salt lake brines. *Construction and Building Materials*, 193, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.211>
- Ma, Hongqiang, Yi, C., & Wu, C. (2021). Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC). *Construction and Building Materials*, 287, 122719.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122719>

- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347–357. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)
- Method, S. T. (2009). *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and*. 1–7.
- Mokhtari, M., & Fatemian, R. (2023). Experimental Study of the Effect of Polypropylene Fiber and Microsilica on the Mechanical Properties of Concrete. *Civil and Project*, 5(1), 22–37. http://www.cpjournals.com/article_171176.html
- Naraganti, S. R., Pannem, R. M. R., & Putta, J. (2019). Impact resistance of hybrid fibre reinforced concrete containing sisal fibres. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(2), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.12.004>
- Pakravan, H. R., Latifi, M., & Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete : A review. *Construction and Building Materials*, 142, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059>
- Pan, Z., & Meng, S. (2016). Three-level experimental approach for creep and shrinkage of high-strength high-performance concrete. *Engineering Structures*, 120, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.009>
- Poursaeed, A., & Hansson, C. M. (2008). The influence of longitudinal cracks on the corrosion protection afforded reinforcing steel in high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(8–9), 1098–1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.018>
- Ruano, G., Isla, F., Luccioni, B., Zerbino, R., & Giaccio, G. (2018). Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 571–585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.129>
- Sciarretta, F., Fava, S., Francini, M., Ponticelli, L., Caciolai, M., Briseghella, B., & Nuti, C. (2021). Ultra-High performance concrete (UHPC) with polypropylene (Pp) and steel Fibres: Investigation on the high temperature behaviour. *Construction and Building Materials*, 304(September), 124608. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124608>
- Shen, D., Kang, J., Yi, X., Zhou, L., & Shi, X. (2019). Effect of double hooked-end steel fiber on early-age cracking potential of high strength concrete in restrained ring specimens. *Construction and Building Materials*, 223, 1095–1105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.319>
- Smarzewski, P. (2019). Study of toughness and macro/micro-crack development of fibre-reinforced ultra-high performance concrete after exposure to elevated temperature. *Materials*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/ma12081210>
- Smarzewski, P., & Barnat-Hunek, D. (2017). Effect of Fiber Hybridization on Durability Related Properties of Ultra-High Performance Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 315–325. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0195-6>
- Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced

- concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669–673.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>
- Take, C. (1 C.E.). slump tests for every test cylinders in accordance with ANSI. *ASTM C143*.
- Test, C. C., Drilled, T., Test, C. C., & Statements, B. (2017). *Standard Test Method for*. 1–5.
<https://doi.org/10.1520/C0496>
- Tian, W., & Han, N. (2017). Experiment Analysis of Concrete's Mechanical Property Deterioration Suffered Sulfate Attack and Drying-Wetting Cycles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5673985>
- Tran, Q., & Ghosh, P. (2020). Influence of pumice on mechanical properties and durability of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 249, 118741.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118741>
- Usman Rashid, M. (2020). Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action. *Construction and Building Materials*, 250, 118910.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118910>
- Vajdian, M., Asghari, K., & Azad, I. (2020). Laboratory study of the effect of various fibers on the physical and chemical properties of fiber concrete. *Civil & Project Journal*, 55–68.
www.cpjournals.com
- Varona, F. B., Baeza, F. J., Bru, D., & Ivorra, S. (2018). Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 159, 73–82.
- Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 96, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>
- Xu, H., Shao, Z., Wang, Z., Cai, L., Li, Z., Jin, H., & Chen, T. (2020). Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction and Building Materials*, 261, 120610.
- Yang, J., Tang, X., Wang, H., Wang, Q., & Cosgrove, T. (2021). Durability and Compression Properties of High-Strength Concrete Reinforced with Steel Fibre and Multi-walled Carbon Nanotube. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 45(3), 1539–1563. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00419-4>
- Yang, Y., Xu, S., Ye, D., & Wang, Z. (2009). Tensile creep behavior of high strength concrete at early ages. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ Journal of the Chinese Ceramic Society*, 37(7), 1124–1129.
- Yu, K., Yu, J., & Lu, Z. (2016). Fracture properties of high-strength / high-performance concrete (HSC / HPC) exposed to high temperature. *Materials and Structures*.
<https://doi.org/10.1617/s11527-016-0804-x>
- Yuan, J., Liu, Y., Tan, Z., & Zhang, B. (2016). Investigating the failure process of concrete under the coupled actions between sulfate attack and drying-wetting cycles by using X-ray CT. *Construction and Building Materials*, 108, 129–138.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.040>

- Zhao, J., Liebscher, M., Michel, A., Schneider, K., Foest, R., Fröhlich, M., Quade, A., & Mechtcherine, V. (2020). Plasma-generated silicon oxide coatings of carbon fibres for improved bonding to mineral-based impregnation materials and concrete matrices. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103667. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103667>
- Zhong, H., & Zhang, M. (2020). Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120914. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120914>
- Zhou, Y., Tian, H., Sui, L., Xing, F., & Han, N. (2015). Strength Deterioration of Concrete in Sulfate Environment: An Experimental Study and Theoretical Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/951209>