



Laboratory Study of the Mechanical Properties of High-Performance Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers

Research Article

Hamid Naraki¹, Seyed Fathollah Sajedi² , Masoud Paknahad³

DOI: [10.22067/jfcej.2025.82494.1231](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.82494.1231)

1-Introduction

Concrete is one of the most widely used products in the world, with various types commonly utilized. Due to the extensive use of this material, many researchers have investigated its engineering properties. The development of construction has led to significant demand for new types of concrete that meet specific needs, such as varying quality levels, strength, toughness, and durability. Some of these categories of concrete include high-strength concrete, engineered concrete, and fiber-reinforced concrete. High performance concrete can be designed for higher efficiency, superior mechanical properties, and increased durability compared to conventional concrete.

Compared to conventional concrete, high-strength concrete possesses excellent compressive and tensile strengths, as well as desirable durability. These properties make it an attractive option for urban infrastructure development. The manufacturing of this type of concrete involves high fineness materials such as microsilica, a low water-to-cement ratio, and superplasticizers. Consequently, it has a higher density, a more compact microstructure, and, subsequently, lower permeability than conventional concrete. Therefore, high performance concretes, especially fiber-reinforced concretes, exhibit greater resistance to degradation and failure processes, such as the penetration of chloride ions, sulfates, corrosive liquids, and damage caused by freeze-thaw cycles and thermal loads. The small amounts of coarse aggregates and their small sizes, combined with a high volume of fibers (approximately 2% to 3%) and significant amounts of microsilica used in these concretes, enhance their strength and ductility. Additionally, the good rheological properties of this type of concrete in its fresh state significantly increase its workability. Fiber-reinforced concretes, aside from having very high compressive strength, also exhibit higher tensile strength compared to conventional concrete. The presence of fibers provides additional tensile toughness. This tensile toughness allows for multiple

microcracks to initiate on the concrete surface before large cracks develop, which results in fiber-reinforced concretes exhibiting more flexible behavior. Consequently, the energy leading to failure in these concretes is significantly higher compared to conventional concrete. Moreover, the fibers within high performance concrete increase the resistance of the cement matrix against spalling due to their entanglement within the concrete's matrix. This presence of fibers also significantly enhances the energy absorption capacity of the concrete, providing desirable resistance to impacts and loads resulting from explosions.

2- Experimental program

In this study, the objective is to introduce an optimal mix design to achieve the highest tensile strength in high-performance concrete. Initially, various mix designs were assessed by altering the proportions of cementitious materials to aggregates and changing the water-to-cement ratio. Ultimately, two mix designs, M1 and M2, were selected as the final designs. In both mix designs, a portion of the cement was replaced with microsilica to achieve better mechanical properties. To ensure desirable workability and reduce the negative effects on fluidity caused by microsilica, a polycarboxylate-based superplasticizer was used. Furthermore, to enhance the quality of high-performance concrete and attain higher tensile strength, two types of fibers -steel and polypropylene - were incorporated. The steel fibers were added in two forms, straight and wavy, at volumetric replacements of 1%, 2%, 3%, and 4%. Additionally, to improve the mechanical properties of these concretes and address some of the weaknesses of steel fibers, 1% of polypropylene fibers were added to the mixes containing steel fibers in separate designs. In total, 306 cubic, cylindrical, and prismatic samples were created across 34 different mix designs, and tests for compressive strength according to ASTM C109, split tensile strength based on

* Manuscript received May 19, 2023, Revised March 15, 2025, Accepted October 04, 2025.

¹ Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

² Professor Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Email: fa.sajedi@iau.ac.ir

³ Assistant Professor, Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

ASTM C496, and flexural strength in accordance with ASTM C1609 were conducted on the samples at 28 days of age. This research can contribute to a better understanding of material combinations and the optimization of high-performance concrete production processes, ultimately leading to the development of durable and resilient infrastructure in construction projects.

3-Discussion

Figure 5 illustrates the compressive strength of concrete samples containing smooth steel fibers. It is evident that high-strength concrete M 1 and M2, without fibers, achieve compressive strengths of 81.2 MPa and 87.1 MPa, respectively. The addition of smooth steel fibers, ranging from 1% to 4% by volume, to the concrete produced in M1 resulted in enhancements of compressive strength of 6%, 14%, 28%, and 26%, respectively. In M2, corresponding increases were recorded as 5%, 19%, 20%, and 19%. In both mix designs, the maximum compressive strength was observed in concrete containing 3% smooth steel fibers, where the strength reached 104.1 MPa for both mixtures. However, in M2, there were no significant changes in compressive strength with the addition of smooth steel fibers in the range of 2% to 4%. This outcome indicates that beyond a certain fiber percentage, substantial improvements in compressive strength are not evident. While some studies have reported that the inclusion of fibers generally leads to minor improvements (less than 10%) in compressive strength, other researchers have noted a positive correlation between the increase in the amount of steel fibers and the compressive strength.

4-Conclusion

- At a specific replacement percentage of steel fibers (3%), the detrimental effect of the reduced volume of the cement matrix due to the addition of steel fibers outweighed the positive impact of the steel fibers in enhancing compressive strength.
- The addition of 1% polypropylene fibers to concrete containing straight and wavy steel fibers resulted in an increase in compressive strength by approximately 7-8%.
- The influence of changing the shape of steel fibers from straight to wavy on improving compressive strength was low, recorded at about 2%.
- Increasing the amount of straight and wavy steel fibers up to 3% led to an increase in split tensile strength in M1 by 44% and 81%, respectively. In M2, this increase was recorded at 49% and 80%.
- The addition of 1% polypropylene fibers to concrete containing 3% wavy steel fibers resulted in the highest split tensile strength of 13.7 MPa. The improvement effect of polypropylene fibers was about 25%.
- The impact of changing the shape of the fibers from straight to wavy on improving split tensile strength was between 20-22%. This increase was independent of the type of mix design.
- More significant than the volume of fibers in improving flexural or split tensile strength was the

distribution and arrangement of the fibers within the concrete matrix.

- The addition of polypropylene fibers led to an average increase in flexural strength of 28% in concrete containing straight fibers and 34% in concrete with wavy fibers.
- Changing the shape of steel fibers from straight to wavy resulted in a 17% increase in flexural strength in concrete without polypropylene fibers and a 12% increase in concrete with polypropylene fibers.



مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن‌های توانمند حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت جداگانه و همزمان*

مقاله پژوهشی

مسعود پاک‌نهاد^(۳)سیدفتح اله ساجدی^(۲)حمید نارکی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.82494.1231

چکیده مقاله حاضر به مطالعه تأثیر جداگانه و همزمان الیاف فولادی با شکل‌های مختلف و الیاف پلی‌پروپیلن بر برخی از خواص مکانیکی بتن‌های توانمند پرداخته است. برای بهبود کیفی ساختار سیمانی از سنگدانه‌های پایه سیلیسی با حداکثر اندازه ۹ میلی‌متر به جای سنگدانه‌های طبیعی استفاده شد. برای مسلح‌سازی و بررسی تأثیر نوع، شکل و میزان الیاف فولادی بر خواص مکانیکی بتن‌های توانمند، الیاف فولادی صاف و موجدار دو سر خم به طول ۳۰ میلی‌متر در ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ به بتن افزوده شدند. در طرح‌های جداگانه‌ای در کنار الیاف فولادی مذکور، الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۱٪ افزوده شد و تغییرات مربوطه در خواص مکانیکی بتن‌های ساخته شده مطالعه شدند. در مجموع ۳۴ طرح اختلاط در قالب ۳۰۶ نمونه مکعبی، استوانه‌ای و منشوری ساخته شدند و مقاومت‌های فشاری، کششی دو نیم شدن و خمشی در سن ۲۸ روزه هر طرح بررسی گردیدند. نتایج نشان دادند که افزودن ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف و موجدار به میزان (۷-۸٪) منجر به رشد مقاومت فشاری می‌شود و این مقاومت به ۱۱۳٪ مگاپاسکال رسید. با افزودن ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی ۳٪ الیاف فولادی موجدار، بیشترین مقاومت کششی دو نیم شدن، معادل ۱۳۷٪ مگاپاسکال کسب شد. همچنین این نتیجه به دست آمد که تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار در مقاومت فشاری تأثیر محسوسی از خود نشان نمی‌دهد در حالی که این تغییر شکل، در مقاومت کششی دو نیم شدن به طور متوسط ۲۲٪ و در مقاومت خمشی تا ۳۴٪ منجر به رشد شد.

واژه‌های کلیدی بتن توانمند، خواص مکانیکی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، میکروسیلیس.

Experimental Study of Mechanical Properties of High- Performance Concrete Containing Steel Fibers and Polypropylene Separately and Simultaneously

Hamid Naraki

Seyed Fathollah Sajedi

Masoud Paknahad

Abstrac This article has studied the separate and simultaneous effect of steel fibers with different shapes and polypropylene (PP) fibers on some mechanical properties of high- performance concrete (HPC). To improve the quality of the cement structure, silica-based aggregates with a maximum size of 9 mm were used instead of natural aggregates. In order to reinforce and investigate the effect of the type, shape and amount of steel fibers on the mechanical properties of HPC, steel fibers in smooth and wavy forms of 30 mm length in 1%, 2%, 3% and 4% were added to the concrete in separate plans. Beside the mentioned steel fibers, PP fibers were added by 1% and the corresponding changes in the mechanical properties were studied. A total of 34 mixing designs were made in the form of 306 cubic, cylindrical and prismatic specimens, and the compressive, tensile, and bending strengths of each design were investigated at the age of 28 days. The results showed that adding 1% of PP fibers to concrete containing smooth and corrugated steel fibers by (7-8)% leads to the growth of compressive strength up to 113.1 MPa. By adding 1% of PP fibers to concrete containing 3% of corrugated steel fibers, the highest tensile strength of 13.7 MPa was obtained. It was also concluded that changing the shape of fibers from straight to wavy does not show a noticeable effect on compressive strength, while this change showed an average increase of 22% in tensile strength and 34% in bending strength.

Key word: High performance concrete (HPC), Mechanical properties, Steel fibers, Polypropylene fibers (PP), Microsilica (SF).

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۷/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی محلات، محلات، اهواز، ایران.

مقدمه

بتن یکی از پرمصرف‌ترین محصولات در دنیا است که گونه‌های مختلفی از آن به طور معمول استفاده می‌شوند. به دلیل مصرف وسیع این ماده بسیاری از محققان ویژگی‌های مهندسی این ماده را تحت تحقیق و بررسی قرار داده‌اند. توسعه ساخت‌وساز باعث شده تا تقاضای زیادی برای بتن‌های جدیدی که در آن‌ها نیازهای خاصی مانند سطوح کیفی مختلف، مقاومت، چقرمگی و دوام وجود دارد، ایجاد شود [3-1]. برخی از این دسته بتن‌ها شامل بتن‌های پرمقاومت، بتن‌های توانمند و بتن‌های توانمند مسلح شده با الیاف می‌باشند. بتن‌های توانمند را می‌توان برای کارایی بالاتر، خواص مکانیکی و دوام بالاتر در مقایسه با بتن‌های معمولی طراحی کرد [4,5].

بتن‌های پرمقاومت، در مقایسه با بتن‌های معمولی، بتن‌های نسبتاً جدیدی هستند که از مقاومت‌های فشاری و کششی و همچنین دوام بسیار مطلوبی برخوردار هستند. وجود این خواص باعث شده تا این نوع از بتن‌ها گزینه‌های جذابی در توسعه زیرساخت‌های شهری محسوب شوند. از آنجایی که در ساخت این نوع از بتن‌ها از مواد با ریزی بالا مانند میکروسیلیس، نسبت پایین آب به مواد سیمانی و فوق‌روان‌کننده استفاده می‌شود، در مقایسه با بتن‌های معمولی، از چگالی بالاتر، ریزساختار متراکم‌تر و متعاقباً از نفوذپذیری کمتری برخوردار هستند [6]. به همین دلیل بتن‌های توانمند، به ویژه بتن‌های توانمند مسلح شده با الیاف، از مقاومت بالاتری در برابر فرایندهای زوال و خرابی مانند تهاجم یون‌های خورنده کلراید، سولفات، نفوذ مایع‌های خورنده و خرابی‌های ناشی از پدیده ذوب و انجماد متوالی و بارهای حرارتی برخوردار هستند [7-9]. مقادیر کم درشت‌دانه و اندازه کوچک آن‌ها و نیز مقدار زیاد الیاف مصرفی (حدود ۲٪ تا ۳٪) و مقادیر زیاد میکروسیلیس در ساخت این بتن‌ها باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری این بتن‌ها می‌شود. به علاوه، خواص رئولوژی خوب این دسته از بتن‌ها در حالت تازه باعث می‌شود تا کارایی آن‌ها به شکل مطلوبی افزایش یابد [10]. بتن‌های توانمند الیافی علاوه بر مقاومت فشاری بسیار بالا، در مقایسه با بتن‌های معمولی از مقاومت کششی بالاتری برخوردار هستند و به دلیل داشتن الیاف از سخت‌شدگی کرنشی بیشتری برخوردارند. این سخت‌شدگی کرنشی باعث می‌شود تا پیش از زمان وقوع ترک-

های وسیع، ریزترک‌های متعددی در سطح بتن شروع به توسعه کنند، لذا این پدیده باعث می‌شود تا بتن‌های توانمند الیافی از رفتار منعطف‌تری برخوردار شوند و انرژی منجر به گسیختگی در آن‌ها در مقایسه با بتن‌های معمولی به میزان قابل توجهی افزایش یابد. به علاوه، الیاف موجود درون بتن‌های توانمند باعث می‌شوند تا به دلیل در هم تنیده شدن درون ملات تشکیل دهنده بتن، ماتریس سیمانی در برابر خاصیت پوسته‌ای شدن مقاومت بیشتری از خود نشان دهد، و نیز وجود همین الیاف باعث می‌شود تا ظرفیت جذب انرژی بتن به شدت افزایش یابد و در برابر ضربات و بارهای ناشی از انفجار مقاومت مطلوبی را از خود نشان دهند [11].

امروزه کاربرد بتن‌های توانمند الیافی در ساخت بتن‌های سبک جدید و یا به عنوان مصالحی به منظور افزایش ظرفیت مقاومتی سازه‌های موجود بیشتر تحت توجه قرار گرفته است [10]. در اروپا، استرالیا و آمریکای شمالی، با افزایش سطح فن‌آوری‌های مرتبط، استفاده از بتن‌های توانمند الیافی به ویژه در ساخت اعضای پل‌ها، تعمیر و بازسازی دال‌ها و یا شمع پل‌ها [12-14]، استفاده در ساخت شاهتیرها چه به صورت پیش‌ساخته و چه ساخت در محل [15] و حتی برای ساخت گره‌های اعضای پیش‌ساخته [16] و یا ساخت اجزای باریک مصرفی در معماری و نما [17] مورد توجه واقع شده‌اند. رشد نگرش متخصصان به استفاده از این ماده باعث شده که در کشوری مانند مالزی با رویکرد ارتقای دوام زیرساخت‌های موجود و یا در حال ساخت، بیش از ۲۰۰ پل مستقر در جاده‌ها با استفاده از این بتن ساخته شوند [18]. در کنار اثرات مطلوب زیست‌محیطی و نیز کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری سازه‌های ساخته شده با این نوع بتن باید از موانعی مانند نبود اطلاعات کافی در خواص عملکرد سازه‌ای، فرایند تعیین کیفی مشخصات مواد مصرفی و نبود استانداردهای کامل در زمینه ساخت این بتن‌ها نیز نام برد. عموماً استانداردهای موجود در ساخت بتن‌های معمولی، ملزومات خاص برای ساخت بتن‌های توانمند و الیافی را پوشش نمی‌دهند. کشورهای مختلفی مانند آلمان، سوئیس، استرالیا، کانادا، اسپانیا و ژاپن در حال توسعه و ارتقای راهنماها و توصیه‌نامه‌های مربوط به ساخت بتن‌های توانمند هستند [19-24]. مسیر تبدیل توصیه‌نامه‌های مرتبط تا تبدیل شدن به استاندارد، مستلزم طی مسیر طولانی شناسایی مصالح

نقاط ضعف الیاف فولادی، در طرح‌های جداگانه‌ای، ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی اضافه شد. در مجموع 306 عدد نمونه مکعبی، استوانه‌ای و منشوری در قالب 34 طرح مخلوط مختلف ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C109 (25)، مقاومت کششی دوتیم شدن بر اساس استاندارد ASTM C496 (26) و مقاومت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C1609 (27) در سن ۲۸ روز بر نمونه‌ها انجام شدند.

مواد و مصالح سنگدانه‌ها

در ابتدا طرح مخلوط‌ها برای ساخت بتن توانمند الیافی با استفاده از سنگدانه‌های طبیعی ارائه شدند، با این حال به دلیل عدم دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، اقدام به تغییر نوع و اندازه سنگدانه‌های مرتبط گردید. به این ترتیب، با حذف سنگدانه‌های درشت، سنگدانه‌های مصرفی با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی‌متر جایگزین شدند. نوع سنگدانه‌ها نیز از حالت معمولی به سنگدانه‌های سیلیسی که از مقاومت و سختی بیشتری نسبت به سنگدانه‌های معمولی برخوردار هستند، تغییر داده شدند. شکل (۱) نشان دهنده مصالح سنگی سیلیسی و شکل (۲) نشانگر دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده می‌باشد.



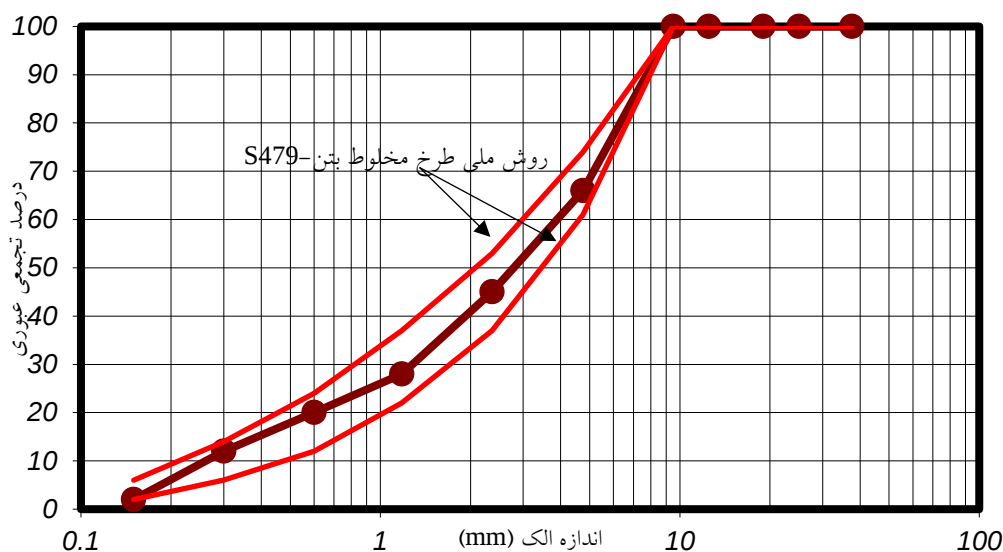
شکل ۱ مصالح سنگی سیلیسی مصرفی در ساخت طرح مخلوط‌ها

مختلف و بررسی رفتار هر یک در شرایط گوناگون است. لذا بدیهی است که محققان مختلف در این رابطه با بهره‌گیری از مواد و مصالح گوناگون و استفاده از روش‌های متفاوت برای اختلاط اقدام به ارائه طرح مخلوط‌های مختلف نمایند.

در این پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از مواد و مصالح گوناگون و استفاده از ترکیبات متفاوت، اقدام به ساخت بتن توانمند با مقاومت کششی بالا گردد. در این میان با تغییر در ساختار سنگدانه‌های طبیعی و تبدیل آن‌ها به سنگدانه‌های پایه سیلیسی و نیز تغییر در حداکثر اندازه آن‌ها و همچنین با استفاده از دو نوع الیاف در شکل‌های مختلف، در طرح مخلوط‌های مختلفی، بتن‌های توانمند متعددی ساخته شده است. در این راستا، خواص مکانیکی بتن‌های توانمند الیافی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دوتیم شدن و مقاومت خمشی ارزیابی گردیدند. عوامل گوناگونی مانند درصد بهینه الیاف فولادی مصرفی، تأثیر شکل الیاف فولادی و نیز تأثیر ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر هر یک از خواص بتن‌ها بررسی شده است.

برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش با هدف معرفی طرح مخلوط بهینه برای دستیابی به بیشترین مقاومت کششی در بتن توانمند، در ابتدا با تغییر در مقادیر نسبت مصالح سیمانی به مصالح سنگی و تغییر در نسبت آب به سیمان، طرح‌های مختلفی سنجش شدند. نهایتاً دو طرح مخلوط M1 و M2 به عنوان طرح‌های نهایی انتخاب شدند. در هر دو طرح برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب‌تر اقدام به جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس شد. برای دستیابی به بتن با کارایی مطلوب و کاهش اثرات نامطلوب در روانی ناشی از میکروسیلیس، از فوق‌روان‌کننده با پایه پلی‌کربکسیلات استفاده شد. به منظور ارتقای سطح کیفی بتن‌های توانمند و دستیابی به مقاومت کششی بالا، از دو نوع الیاف فولادی و پلی پروپیلن استفاده گردید. الیاف فولادی در دو شکل صاف و موجدار در جایگزینی‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ حجمی به ماتریس سیمانی افزوده شدند. علاوه بر آن در راستای بهبود خواص مکانیکی این بتن‌ها و پوشش برخی از



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی‌متر

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی و سنگدانه‌های مصرفی در تحقیق

ماده	SiO _۲	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	CaO	MgO	SO _۳	LOI
سیمان	۲۱/۲۸	۳/۷	۶/۱	۶۴/۳۴	۲/۱	۲/۱۳	۲/۲
میکروسلیس	۹۴/۷۳	۰/۸۷	۱/۲۳	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۱	-
سنگدانه‌های سیلیسی	۹۹/۲	۰/۰۳	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۰۰۲۵	-	-

مواد سیمانی

سیمان استفاده شده در طرح مخلوط‌ها از نوع ۲ مربوط به کارخانه سیمان رامهرمز واقع در استان خوزستان بود و برای ارتقای سطح کیفی مخلوط از جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسلیس استفاده گردید. ترکیبات شیمیایی هر یک از مواد سیمانی و همین‌طور سنگدانه‌های سیلیسی در جدول (۱) ارائه شده است.

آب و مواد افزودنی

آب استفاده شده در ساخت مخلوط‌ها و عمل‌آوری نمونه‌ها، آب شرب اهواز بود و برای دستیابی به روانی مطلوب از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی کربکسیلات به میزان ۱/۸٪ وزن مواد سیمانی استفاده شده است.

الیاف

الیاف فولادی در دو دسته فولادی و پلی پروپیلن استفاده

گردیدند. الیاف فولادی با طول ۳۰ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر با نسبت ظاهری ۳۷/۵ و مقاومت کششی ۱۱۰۰ مگاپاسکال استفاده شدند. برای بررسی تأثیر شکل الیاف بر خواص مکانیکی بتن‌ها، الیاف فولادی در دو شکل صاف دو سر خم و موجدار دو سر خم استفاده شد و برای بررسی تأثیر میزان الیاف، جایگزینی‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ حجمی این دو نوع الیاف به کار برده شدند. از آنجایی که به دلیل شکل و سختی الیاف فولادی، مشاهده گردید که تمام مقطع ماتریس بتنی با الیاف پوشش داده نمی‌شود، از الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۲۵ میلی‌متر با مقاومت کششی ۴۰۰ مگاپاسکال به میزان ۱٪ حجمی در ساخت مخلوط‌ها نیز استفاده شد. شکل (۳) انواع الیاف استفاده شده در طرح مخلوط‌ها را نشان می‌دهد.



(ج) الیاف پلی پروپیلن



(ب) الیاف فولادی صاف



(الف) الیاف فولادی موجدار

شکل ۳ الیاف فولادی و پلی پروپیلن استفاده شده در طرح مخلوط‌ها

جدول ۲ جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق (kg/m^3)

عنوان طرح	سیمان	مصالح سنگی	آب (لیتر)	میکروسیلیس	فوق روان‌کننده	نسبت آب به مواد سیمانی
M ₁	۹۶۰	۷۰۰	۳۰۰	۳۳۰	۲۳	۰/۲۳
M _۲	۸۵۰	۹۰۰	۲۷۰	۳۰۰	۲۱	۰/۲۳



(ج) مقاومت خمشی سه نقطه‌ای



(ب) مقاومت کششی دو نیم شدن



(الف) مقاومت فشاری

شکل ۴ تصاویری از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌ها

طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها و نام‌گذاری آن‌ها

جدول (۲) نشانگر دو طرح مخلوط M₁ و M₂ به عنوان طرح مخلوط‌های استفاده شده هستند. با توجه به خاص بودن بتن توانمند الیافی، علاوه بر کاهش حداکثر اندازه سنگدانه‌های سیلیسی، میزان سیمان و میکروسیلیس مصرفی به شکل قابل توجهی افزایش یافته است و در مقابل به دلیل استفاده از فوق روان‌کننده به میزان ۱/۸٪ وزن مواد سیمانی، نسبت آب به سیمان تا حد امکان کاهش یافته و به مقدار ۰/۲۳ رسانده شد. برای اختلاط مواد، ابتدا سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک، با سیمان درون مخلوط‌کن به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. سپس ترکیب آب، فوق‌روان‌کننده و میکروسیلیس به شکل دوغاب و به آهستگی در زمان ۲ دقیقه به مخلوط افزوده شدند. پس از آن الیاف موجود به آهستگی به مخلوط اضافه

شدند و پس از طی زمان ۳ دقیقه از اختلاط کامل نسبت به تخلیه مخلوط‌کن اقدام شد. برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۰ سانتی‌متر، برای آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن از نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و برای تعیین مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری به ابعاد ۲۵×۲۵×۲۵ سانتی‌متری استفاده شد. در شکل (۴) نمونه‌های ساخته شده و آزمایش‌های انجام شده روی آن‌ها نشان داده شده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها برای آدرس‌دهی ساده در مقاله، نمایه M بیانگر طرح مخلوط و اندیس زیر آن نشانگر شماره آن است. نمایه S نشانگر الیاف فولادی و اندیس زیر آن بیانگر میزان درصد مصرفی آن در مخلوط بتنی است. در طرح مخلوط‌هایی هم که در کنار الیاف فولادی ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن به کار برده شد، از نمایه و اندیس P₁ استفاده شده است.

تحلیل نتایج آزمایش‌ها

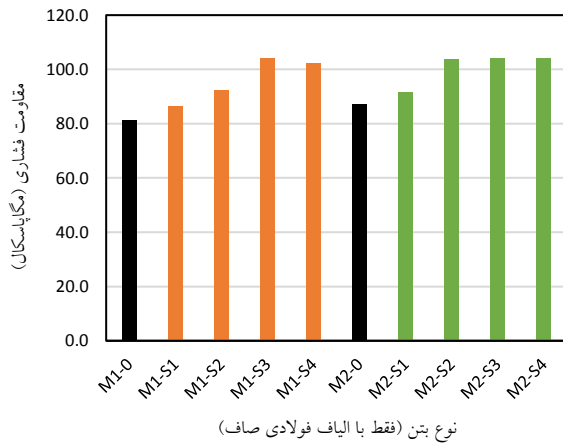
مقاومت فشاری

بررسی تأثیر نوع و میزان الیاف. شکل (۵) نشان دهنده مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده حاوی الیاف فولادی صاف است. دیده می‌شود که بتن‌های پرمقاومت با طرح مخلوط های ۱ و ۲ بدون الیاف قادرند تا به مقاومت فشاری ۸۱/۲ و ۸۷/۱ مگاپاسکال برسند. افزودن الیاف فولادی از ۱٪ تا ۴٪ حجمی به بتن‌های ساخته شده در طرح مخلوط ۱، به ترتیب منجر به رشد ۶٪، ۱۴٪، ۲۸٪ و ۲۶٪ می‌شود، در حالی که در اثر افزودن همین میزان الیاف به طرح مخلوط ۲، میزان رشد مقاومت به ترتیب معادل ۵٪، ۱۹٪، ۲۰٪ و ۱۹٪ ثبت شد. در هر دو طرح مخلوط ۱ و ۲ حداکثر مقاومت در بتن حاوی ۳٪ الیاف فولادی صاف مشاهده شد، جایی که مقاومت فشاری هر دو طرح به عدد ۱۰۴/۱ مگاپاسکال رسید. با این حال در طرح مخلوط ۲، با ۲٪ تا ۴٪ الیاف فولادی صاف، تغییرات محسوسی در مقاومت فشاری مشاهده نشد. این نتیجه نشان می‌دهد که پس از درصد خاصی از افزودن الیاف، مقاومت فشاری با رشد چشم‌گیری مواجه نمی‌شود. اگرچه برخی از مطالعات نشان داده‌اند که افزودن الیاف به طور کلی باعث بهبودی کمی (کمتر از ۱۰٪) در مقاومت فشاری می‌شوند [28-30] ولی در مقابل برخی دیگر از محققان نشان دادند که با افزایش مقدار الیاف فولادی، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد [31-32]. نتایج نشان داد که افزودن ۴٪ الیاف فولادی صاف به بتن، باعث شده تا مقاومت فشاری اندکی با کاهش نیز مواجه شود. اصولاً به نظر می‌رسد در درصد خاصی از جایگزینی الیاف فولادی، تأثیر مخرب کاهش حجم ماتریس سیمانی در اثر افزودن الیاف فولادی بیشتر از تأثیر مثبت عملکرد الیاف فولادی در افزایش مقاومت است. در راستای این نتیجه یانگ و همکاران (Yang et al.) نیز نشان دادند که افزایش مقاومت فشاری با استفاده از افزودن الیاف فولادی آنچنان که در مشخصه‌ای مانند مقاومت کششی مؤثر است، مطرح نیست؛ زیرا مقاومت فشاری بتن به میزان زیادی تحت تأثیر مقاومت ماتریس سیمانی است [33]. به علاوه باید به این نکته نیز توجه داشت که در اثر تجمع بیش از حد الیاف فولادی و تأثیر متقابل آن‌ها بر هم، احتمال گلوله‌ای شدن آن‌ها بیشتر می‌شود و این نتیجه باعث می‌شود تا به شکل مطلوبی در رشد مقاومت فشاری مؤثر نباشند. لذا در همین

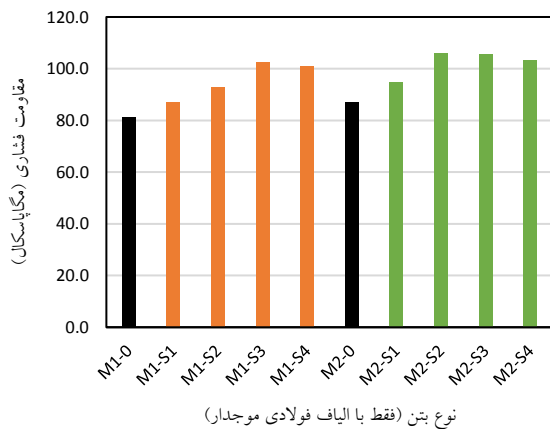
راستا است که اسماعیلی و الموانس حتی از تأثیر مطلوب الیاف فولادی بر مقاومت فشاری چشم‌پوشی کردند [34].

مشابه همین رفتار در بتن‌های ساخته شده با طرح مخلوط‌های ۱ و ۲ حاوی الیاف موجدار نیز مشاهده شد (شکل ۶). در طرح مخلوط ۱، میزان رشد مقاومت در اثر افزودن الیاف بین ۷٪ تا ۲۶٪ ثبت شد که این رفتار بسیار مشابه با رفتار مقاومتی بتن‌های حاوی الیاف صاف است. در طرح مخلوط ۲ نیز رشد بین ۹٪ تا ۲۲٪ برای افزودن الیاف از ۱٪ تا ۴٪ به بتن مشاهده شد. هرچند که نتایج مربوط به طرح مخلوط ۲ اندکی بیشتر از طرح مخلوط ۱ است، با این حال در طرح مخلوط ۱، اگرچه افزودن ۳٪ الیاف فولادی به بتن در مقایسه با جایگزینی ۲٪، با رشد مقاومتی حدود ۱۰ مگاپاسکال مواجه شده، ولی تأثیر افزودن ۴٪ الیاف در مقایسه با ۳٪ الیاف موجدار، اندکی کاهشی است. مشابه این رفتار در طرح مخلوط ۲ نیز دیده شد، جایی که تفاوت چشمگیری از منظر کسب مقاومت در جایگزینی‌های ۲٪ تا ۴٪ الیاف فولادی موجدار مشاهده نمی‌شود؛ با این حال افزودن ۴٪ الیاف فولادی موجدار در بتن باعث شده تا مقاومت فشاری اندکی نیز کاهش یابد. لذا می‌توان گفت که به دلایل فنی و هم اقتصادی (به ویژه در طرح مخلوط ۲) جایگزینی ۴٪ الیاف فولادی (چه صاف و چه موجدار) تأثیر محسوسی در مقاومت فشاری بتن در مقایسه با جایگزینی‌های ۲٪ و ۳٪ ندارد. یو و همکاران (Yu et al.) نیز معتقدند که با افزایش مقدار الیاف فولادی از ۰٪ تا ۵٪، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و در سطحی رو به کاهش خواهد رفت، لذا آن‌ها نیز پیشنهاد کردند تا برای کسب مطلوبیت‌های اقتصادی و مهندسی در این بتن‌ها مقدار الیاف فولادی بین ۲٪ تا ۳٪ محدود شود [35]. به نظر می‌رسد که علاوه بر پدیده گلوله‌ای شدن الیاف‌های فولادی در اثر ازدحام و تجمع آن‌ها، می‌توان اختلالی که در جریان‌پذیری بتن تازه روی می‌دهد و تأثیر مستقیم آن بر ریزساختار بتن را نیز به عنوان یکی از دلایل افت مقاومت فشاری در بتن محسوب کرد. به همین دلیل یو و همکاران (Yoo et al.)، وو و همکاران (Wu et al.) و نیز السلمان و همکاران (Alsalman et al.) بر این باورند که اگر مقدار الیاف فولادی در بتن کمتر از ۳٪ باشد با افزودن الیاف می‌توان مقاومت فشاری را افزایش داد ولی افزایش الیاف بیش از این حد می‌تواند منجر به کاهش مقاومت فشاری شود [36-38].

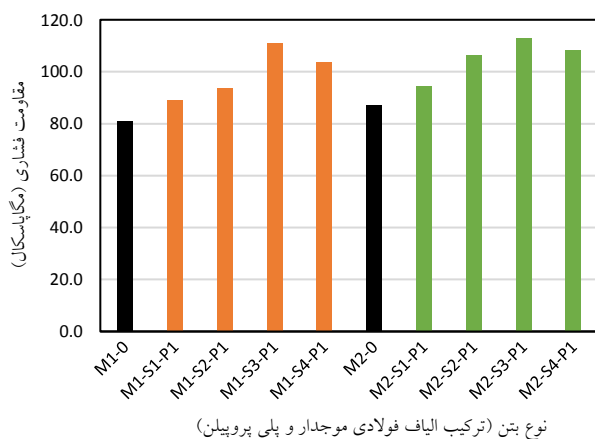
شکل (۷) بیانگر مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های ۱ و ۲



شکل ۵ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی صاف



شکل ۶ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی موجدار

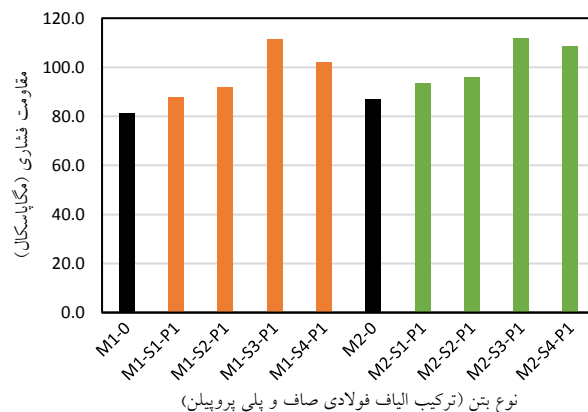


شکل ۸ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی موجدار و پلی پروپیلن

حاوی الیاف فولادی صاف و ترکیب آن‌ها با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن است. همان طور که در بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف مشاهده شد، افزودن ۱٪ تا ۴٪ الیاف فولادی صاف در هر دو طرح مخلوط رشدی بین ۶٪ تا ۲۶٪، در مقاومت فشاری را از خود نشان داد. با این حال در همین طرح‌ها با افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن بازه رشد مقاومت گسترده‌تر شد و در طرح مخلوط ۱ این رشد بین ۸٪ تا ۳۷٪ و در طرح مخلوط ۲ بین ۷٪ تا ۲۸٪ ثبت شد. در درصد جایگزینی بهینه الیاف فولادی صاف (۳٪)، با افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن در طرح مخلوط ۱، مقاومت از ۱۰۴/۱ به ۱۱۱/۵ مگاپاسکال رسید (رشد ۷٪). این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن می‌تواند باعث شود تا بخش‌های ماتریس سیمانی بتن عاری از الیاف پلی پروپیلن، در اثر افزودن این الیاف به شکل مطلوبی تسلیح شوند و بتوانند در زمانی که تحت تنش‌های فشاری زیاد قرار می‌گیرند، ظرفیت مقاومتی بتن را افزایش دهند. بانتیا و همکاران (Bantia et al.) نیز در اثر ترکیب الیاف‌های گوناگون بهبودی محسوسی در خواص ماتریس سیمانی و عملکرد بتن در برابر توسعه ترک مشاهده کردند [39]. در برخی از مطالعات در اثر ترکیب ۴ درصد مختلف الیاف فولادی با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن نیز مشابه همین نتایج کسب شد به نحوی که با افزایش الیاف فولادی تا مقدار معینی به مقاومت فشاری افزوده شده و پس از آن کاهش مقاومت فشاری مشاهده گردید [40]. با این حال لیبره و همکاران (Libre et al.) مقدار بهینه الیاف پلی پروپیلن برای ترکیب با الیاف فولادی را ۰/۴٪ معرفی کرده است [41]. مشابه همین رفتار در طرح مخلوط ۲ نیز مشاهده شد، به نحوی که افزودن الیاف پلی پروپیلن در کنار ۳٪ بهینه الیاف فولادی صاف باعث شد تا رشد مقاومتی معادل ۷٪ در بتن ایجاد شود. از شکل (۷) مشاهده می‌شود که افزودن ۴٪ الیاف فولادی به بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن نیز تأثیر مطلوبی در مقاومت فشاری از خود نشان نمی‌دهد و بتن در این درصد از جایگزینی الیاف فولادی صاف، با افت مقاومت مواجه می‌شود. در تأیید نتایج کسب شده بالا، منگ و خیاط (Meng and Khayat) و نیز لی‌هونگ و فلینگ (Hoang and Fehling) معتقدند که جایگزینی ۳٪ الیاف فولادی مرزی است که پس از آن به دلیل انباشتگی الیاف و افزایش احتمال ورود حفرات هوا به درون بتن نمی‌توان به مقاومت بالاتری دست یافت. لذا حتی در اثر ترکیب این مقدار الیاف فولادی با الیاف‌های دیگر، رشد مقاومتی چشمگیری روی نخواهد داد [42,44].

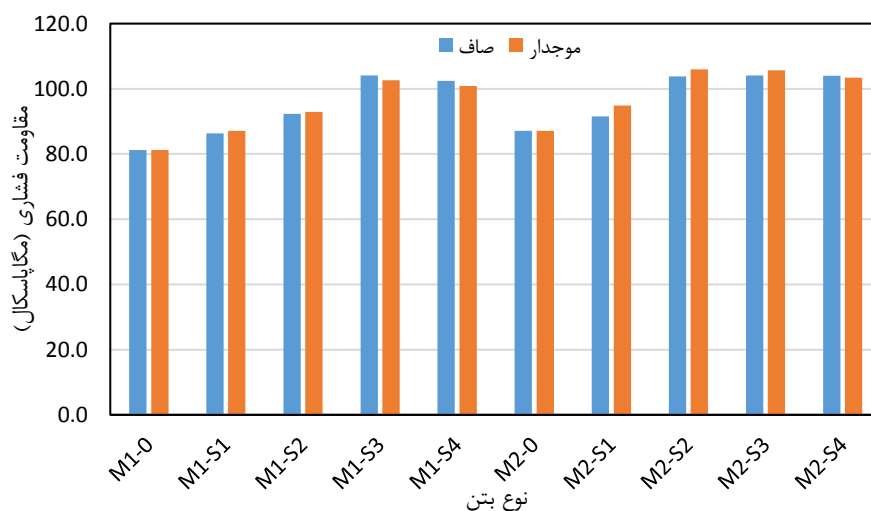
(۶) و (۸) می‌توان دید، جایی که در جایگزینی بهینه ۳٪ الیاف فولادی موجداری در طرح مخلوط ۱، افزودن ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث شد تا مقاومت فشاری ۸٪ رشد کند، این رفتار در بتن ساخته شده از طرح مخلوط ۲، معادل ۷٪ ثبت شد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف و موجداری، باعث می‌شود تا مقاومت فشاری به اندازه ۷-۸٪ (۷-۸) رشد کند.

بررسی تأثیر شکل الیاف. شکل (۹) نشانگر مقایسه مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های ۱ و ۲ حاوی الیاف فولادی صاف و موجداری است. به طور کلی استفاده از الیاف فولادی موجداری به دلیل افزایش میزان درگیری طول الیاف به ماتریس سیمانی و افزایش مقاومت پیوستگی با آن، باعث می‌شود تا اندکی مقاومت فشاری در مقایسه با الیاف فولادی صاف بیشتر شود. این میزان به طور متوسط حدود ۲٪ است، با این حال استثنائاتی نیز مشاهده می‌شود که در آن‌ها مقاومت فشاری در اثر استفاده از الیاف موجداری به جای الیاف صاف، تأثیر محسوسی از خود نشان نداده است. شکل (۱۰) نشانگر تأثیر نوع الیاف فولادی موجداری و صاف بر مقاومت فشاری در طرح مخلوط‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن است. دیده می‌شود که در مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت همزمان نیز تغییرات در شکل الیاف تأثیر محسوسی در مقاومت از خود نشان نداده است و بازه تغییرات آن به نحوی بوده که در هر دو حالت کاربرد الیاف موجداری و یا الیاف صاف بعضاً با رشد و یا افت جزئی مقاومت نسبت به حالت دیگر مواجه شده است.

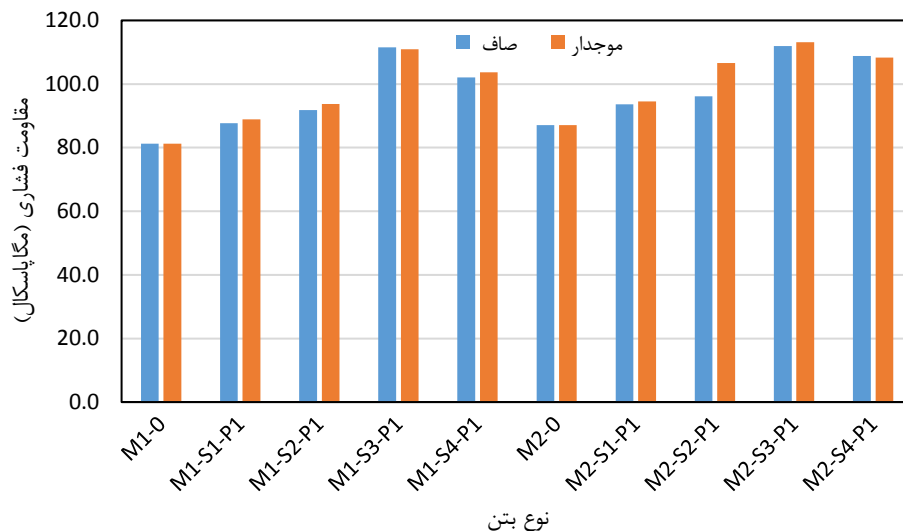


شکل ۷ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن

شکل (۸) نشانگر مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های ۱ و ۲ حاوی الیاف فولادی موجداری و ترکیب آن‌ها با الیاف پلی‌پروپیلن است که دیده می‌شود نیز به طرز معنی‌داری مشابه رفتار همین بتن‌ها، حاوی الیاف فولادی صاف (شکل ۷) است. مشهود است که رفتار نزولی مقاومت در جایگزینی پس از ۳٪ الیاف فولادی موجداری وجود دارد. میزان بازه رشد مقاومتی در اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در هر دو طرح مشابه با الیاف صاف و معادل ۹٪ تا ۳۶٪ برای طرح اول و ۷٪ تا ۳۰٪ برای طرح دوم است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که هر دو طرح مخلوط ۱ و ۲، چه با الیاف فولادی صاف و چه با الیاف فولادی موجداری ساخته شده باشند، در اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن، با یک بازه رشد مقاومتی مشابه مواجه می‌شوند. همچنین تأثیر به‌کارگیری الیاف پلی‌پروپیلن را در مقایسه نتایج در شکل‌های



شکل ۹ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ دارای الیاف فولادی صاف و موجداری

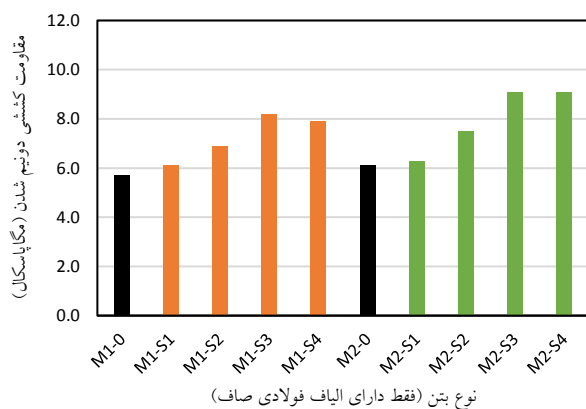


شکل ۱۰ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ دارای الیاف فولادی صاف و موجدار و الیاف پلی‌پروپیلن

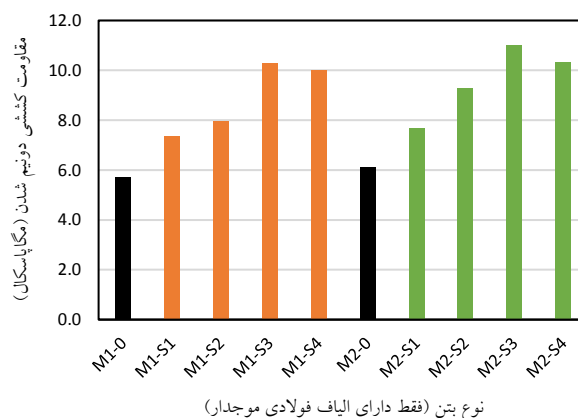
مقاومت کششی دونیم شدن

بررسی تأثیر نوع و میزان الیاف. در نمونه‌های بدون الیاف فولادی، مقاومت کششی بتن به ۵/۷ مگاپاسکال رسیده است. این میزان از مقاومت برای بتن عاری از الیاف نشان دهنده بافت مطلوب و پیوسته ماتریس سیمانی و درگیری کامل ماتریس سیمانی و سنگدانه‌های مصرفی است. البته کیفیت سنگدانه‌های استفاده شده سیلیسی که از سختی بیشتری نسبت به سنگدانه‌های معمولی برخوردار هستند، در تأمین این مقاومت کششی بی‌تأثیر نیست. به طور کلی در تمام شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) دیده می‌شود که با افزایش میزان الیاف فولادی مقاومت کششی نیز افزایش یافته است. به طور نمونه، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) در طرح مخلوط ۱، افزایش ۱٪ تا ۴٪ الیاف فولادی صاف و موجدار باعث شد تا در ۳٪ الیاف فولادی مقاومت کششی به ترتیب ۴۴٪ و ۸۱٪ رشد کند. رشد چشمگیر مقاومت کششی پس از جایگزینی بهینه ۳٪ رو به کاهش گذاشت و در جایگزینی ۴٪ این میزان به ۳۹٪ و ۷۵٪ رسید. سونگ و هوانگ (Song and Hwang) نیز در مطالعه خود این سطح بهینه را ۲٪ معرفی کردند و میزان رشد مقاومت کششی در مقایسه با بتن مرجع را معادل ۹۸٪ گزارش کردند [44]. به - طور کلی یانگ و همکاران (Yang et al.) معتقدند که در اثر افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی به شکل مطلوبی افزایش

می‌یابد، اما چنانچه مقدار الیاف از حد معینی افزایش یابد، مقاومت کششی نیز رو به کاهش خواهد رفت. با این حال آن‌ها معتقدند که این مقدار معین، همیشه یک عدد ثابت نیست و می‌تواند تابع شرایط مختلف باشد [45]. در همین راستا وو و همکاران (Hu et al.) این مقدار بهینه را ۵٪، منگ و همکاران (Meng et al.) این مرز را ۳٪ و حتی لی و همکاران (Li et al.) عدد ۲٪ را به عنوان مرزهای پیشنهادی خود معرفی کردند [42,46,47]. در طرح مخلوط ۲ نیز روند کسب مقاومت کششی و پس از آن افت مقاومت کششی پس از ۳٪ افزودن الیاف فولادی صاف و یا موجدار نیز مشاهده می‌شود، با این تفاوت که در طرح مخلوط ۲، در جایگزینی ۴٪ الیاف صاف، تغییری در مقاومت کششی مشاهده نشد و در حالت استفاده از الیاف موجدار، مقاومت کششی اندکی کاهش یافته است. لذا مشابه آنچه که لی و همکاران نشان دادند وقتی که الیاف از مقدار معینی بیشتر شود، تأثیرات نامناسب آن از تأثیرات مثبت عملکردی آن پیشی می‌گیرد لذا مقاومت کششی نمی‌تواند دیگر با افزایش مقدار الیاف بیشتر شود [47]. مشهود است که نتایج مقاومت کششی دونیم شدن در طرح مخلوط ۲، نسبت به نتایج مشابه در طرح مخلوط ۱ بیشتر است. لذا از منظر مؤلفه مقاومت کششی دونیم شدن، می‌توان طرح مخلوط ۲ را به عنوان طرح بهینه معرفی کرد.



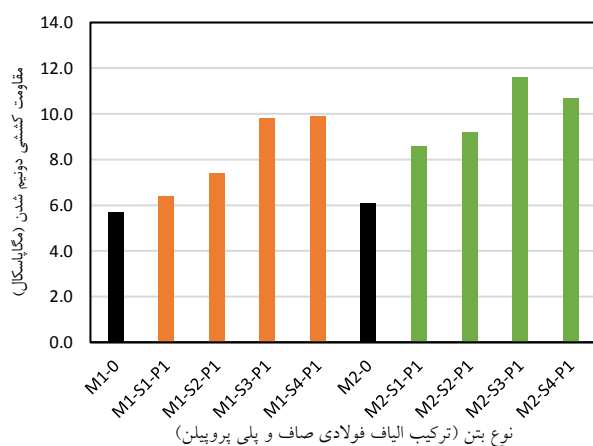
نوع بتن (فقط دارای الیاف فولادی صاف)



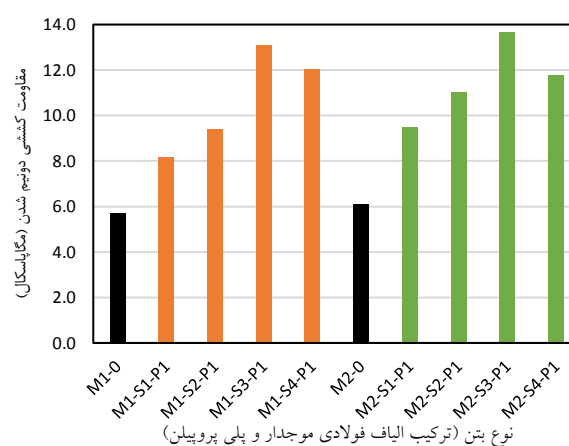
نوع بتن (فقط دارای الیاف فولادی موجدار)

شکل ۱۱ مقاومت کششی دومین شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی صاف

شکل ۱۲ مقاومت کششی دومین شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی موجدار



نوع بتن (ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن)



نوع بتن (ترکیب الیاف فولادی موجدار و پلی پروپیلن)

شکل ۱۳ مقاومت کششی دومین شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن

شکل ۱۴ مقاومت کششی دومین شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی موجدار و پلی پروپیلن

الیاف فولادی صاف به ۲۵٪ رسیده است. مشابه این رفتار نیز در رشد ۲۰٪ مقاومت کششی دومین شدن در طرح مخلوط ۲، در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن به ۳٪ الیاف فولادی صاف نیز مشهود است. در شکل (۱۴) بیشترین میزان مقاومت کششی دومین شدن برای بتن ساخته شده از طرح مخلوط ۲ حاصل شده است، جایی که افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن باعث شده تا مقاومت کششی دومین شدن بتن حاوی ۳٪ الیاف فولادی موجدار از ۱۱ به ۱۳/۷ مگاپاسکال برسد. این نتیجه نشان می‌دهد که گرچه در مقایسه با سایر الیاف موجود، به دلیل ظرفیت کششی بالای الیاف فولادی، امکان دستیابی به مقاومت کششی بالا با استفاده از الیاف فولادی ممکن است، ولی در

شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) نشانگر مقاومت کششی دومین شدن نمونه‌های ساخته شده با طرح مخلوط‌های ۱ و ۲ می‌باشند. با مقایسه نتایج کسب شده از شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مربوط به بتن‌های حاوی ترکیب الیاف فولادی صاف و موجدار با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن، می‌توان دید که مقاومت کششی مرتب رو به افزایش است. لذا در هر درصدی از جایگزینی الیاف فولادی (چه صاف و چه موجدار) می‌توان اثر مثبت استفاده از الیاف پلی پروپیلن را دید. در شکل (۱۳) در طرح مخلوط ۱ استفاده از الیاف پلی پروپیلن باعث شده تا مقاومت کششی در جایگزینی ۳٪ الیاف فولادی صاف با ۲۰٪ رشد نسبت به حالت بدون استفاده از این الیاف برسد. این رشد در جایگزینی ۴٪

است و عملاً از ظرفیت بالای مقاومت کششی الیاف فولادی در تقویت ماتریس سیمانی استفاده نشده است. دو سر ترک ایجاد شده در میانه مقطع توسط تعداد معدودی از الیاف فولادی دوخته شده است، لذا امکان توسعه ترک و گسیختگی برشی سریع‌تر در بتن امکان‌پذیر است. این در حالی است که در شکل (۱۵ - ب) دیده می‌شود که به دلیل اضافه شدن الیاف پلی پروپیلن و امکان توزیع گسترده آن‌ها در تمام مقطع بتنی، به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد آن‌ها، تمام دو سر مقطع گسیخته شده توسط الیاف پلی پروپیلن دوخته شده است، لذا به دلیل ایجاد پل‌سازی‌های متعدد در دو سوی دهانه ترک، گسترش ترک در مقطع محدودتر و دهانه آن به میزان بسیار زیادی کوچک‌تر شده است.

بررسی تأثیر شکل الیاف. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نیز تأثیر شکل الیاف فولادی را بر مقاومت کششی دونیم شدن در طرح مخلوط‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد. شکل (۱۶) که نشان دهنده بتن‌های حاوی تنها الیاف فولادی است، در هر دو طرح مخلوط ۱ و ۲ استفاده از الیاف فولادی موجود در مقایسه با الیاف صاف تأثیر قابل‌توجه‌تری در کسب مقاومت کششی دونیم شدن از خود نشان داده است. به این ترتیب که متوسط رشد مقاومت کششی در طرح مخلوط ۱ در اثر تغییر شکل الیاف، معادل ۲۲٪ می‌باشد. این رشد به طور متوسط در طرح مخلوط ۲ معادل ۲۰٪ ثبت شد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار حداقل ۲۰٪ در رشد مقاومت کششی دونیم شدن مؤثر است. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که نوع طرح مخلوط تأثیر به‌سزایی در افزایش مقاومت ناشی از تغییر شکل الیاف ندارد، زیرا در هر دو طرح مخلوط میزان رشد بین ۲۰٪ تا ۲۲٪ ثبت شده است. در شکل (۱۷) که بیانگر تأثیر تغییر شکل الیاف در طرح مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن است، می‌توان دید که تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار در بتن حاوی ۳٪ الیاف فولادی موجدار حتی می‌تواند منجر به رشد مقاومت به میزان ۳۴٪ گردد، البته در مقایسه با سایر درصدهای جایگزینی الیاف فولادی که از متوسط رشد ۲۰٪ برخوردار هستند، می‌توان همان رشد متوسط ۲۰٪ را به عنوان حداقل تأثیر تغییر شکل الیاف اعلام کرد.

همین درصد جایگزینی، در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن می‌توان رده مقاومت کششی بتن‌های توانمند را نیز ارتقا بخشید و این میزان را تا حدود ۲۵٪ رشد داد. لذا در راستای اصلاح و ارتقای دیدگاه محققانی که معتقدند به دلیل اختلال در رفتار رئولوژی بتن و متعاقباً حصول ریزساختار متخلخل در بتن با گذشت از مرز خاصی از الیاف فولادی، و در نتیجه افت مقاومت کششی (مشابه با نتایج کسب شده در همین مقاله) [42,46]. می‌توان در همان مرز بهینه، با افزودن الیاف با ویژگی‌های خاص، به مقاومت کششی مطلوب‌تری دست یافت.



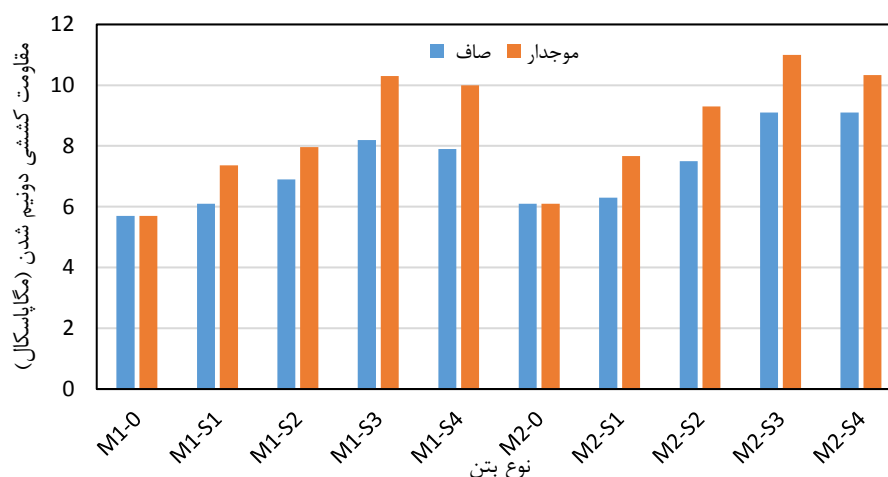
(الف) مقطع حاوی الیاف فولادی



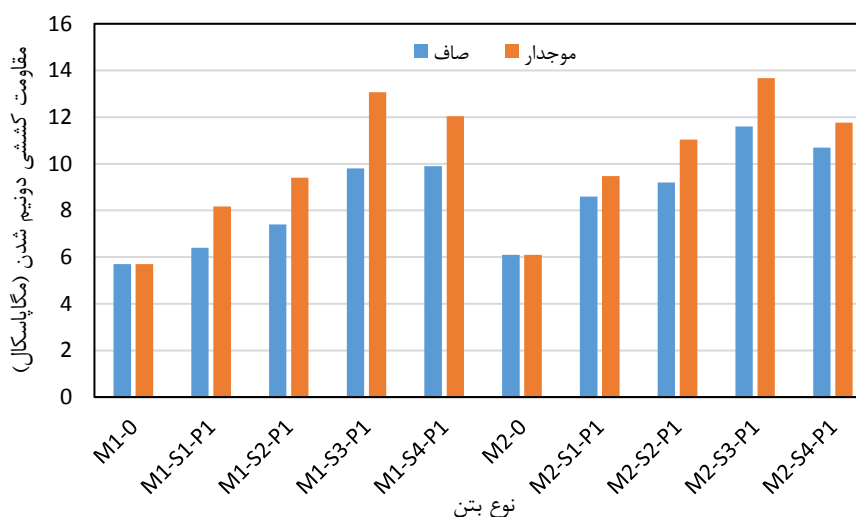
(ب) مقطع حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن

شکل ۱۵ مقاطع شکسته شده از نمونه‌های استوانه‌ای حاوی انواع الیاف

طبق شکل (۱۵ - الف) دیده می‌شود که مقطع استوانه‌ای شکسته شده حاوی فقط الیاف فولادی است. به علاوه، که ماتریس سیمانی در بخش‌های زیادی عاری از هر گونه الیاف



شکل ۱۶ مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ فقط دارای الیاف فولادی



شکل ۱۷ مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ دارای ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن

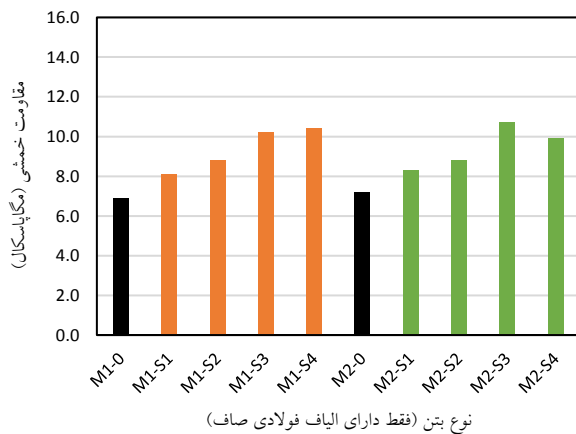
مقاومت خمشی

بررسی تأثیر نوع و میزان الیاف. شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) نشان دهنده مقاومت خمشی بتن‌های ساخته شده هستند. مشابه مقاومت کششی دونیم شدن، مقاومت خمشی بتن‌های بدون الیاف نیز به دلیل بافت پیوسته و عاری از تخلخل و نیز کیفیت بالای سنگدانه‌های سیلیسی در مقایسه با بتن‌های معمولی از میزان مطلوبی برخوردار هستند. طبق شکل (۱۸) با افزودن هر یک از درصدهای جایگزینی الیاف فولادی صاف به طرح مخلوط‌های ۱ و ۲، مقاومت خمشی نیز افزایش می‌یابد، به نحوی که این میزان برای بتن‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی

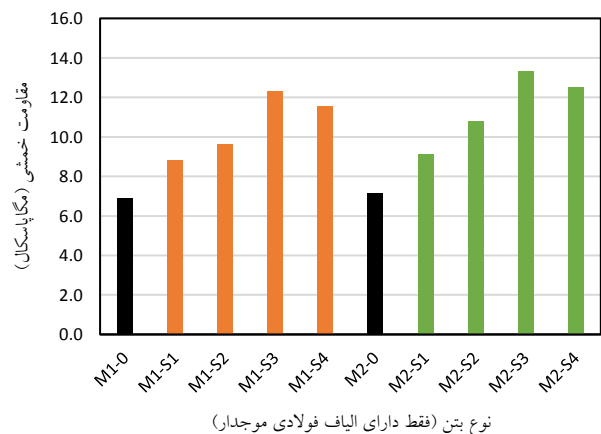
صاف معادل ۸/۱ به ۱۰/۴ مگاپاسکال برای بتن‌های حاوی ۴٪ الیاف فولادی صاف رسیده است. برخلاف مقاومت کششی، مقاومت خمشی در بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف در مقایسه با جایگزینی ۳٪ اندکی بیشتر شده است، ولی این میزان افزایش قابل توجه نیست. لذا می‌توان بهترین میزان رشد را در جایگزینی ۳٪ از این الیاف دید. نتایج کسب شده برای طرح مخلوط ۲ اندکی از نتایج کسب شده در طرح مخلوط ۱ مطلوب‌تر است، به همین ترتیب این نتایج در مقاومت خمشی برای استفاده از الیاف صاف نیز دیده می‌شوند. با مقایسه نتایج در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) می‌توان دید که استفاده از الیاف

جایگزینی ۴٪ الیاف فولادی، بیانگر این است. طبق شکل (۲۲) که بیانگر توزیع نامتقارن الیاف فولادی در مقطع نمونه شکسته شده است، به نظر می‌رسد آنچه که بیشتر از میزان الیاف در بهبود مقاومت خمشی و یا حتی مقاومت کششی دونیم شدن مؤثر است، نحوه توزیع و استقرار آن‌ها درون مقطع بتنی است. چرا که مطابق آنچه که یوو و همکاران (Yoo et al.) بیان کردند نحوه توزیع درست الیاف‌های فولادی می‌تواند در دوختن صحیح و منظم ترک‌های داخلی مؤثر باشد [48]. مؤید این نظر را می‌توان در نتایج مندرج در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) و نیز شکل (۲۳) که مقطع شکسته شده نمونه خمشی ساخته شده حاوی الیاف پلی‌پروپیلن است، ملاحظه کرد.

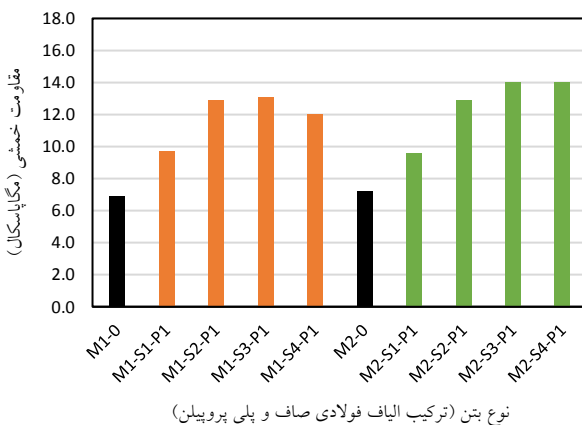
موجدار توانسته تا مقاومت خمشی را بهبود بخشد. به طور متوسط تأثیر استفاده از الیاف فولادی موجدار در بتن‌های عاری از الیاف پلی‌پروپیلن در مقاومت خمشی در مقایسه با بتن مرجع معادل ۵۳٪ در طرح مخلوط ۱ و معادل ۵۵٪ در طرح مخلوط ۲ ثبت شد. مشابه آنچه که منگ و خیاط (Meng et al.) نشان دادند که در افزودن بیش از ۳٪ الیاف فولادی منجر به انباشتگی بیش از حد الیاف در مقطع و در پی آن افت محسوس مقاومت خمشی می‌شود [42]. از نتایج کسب شده این تحقیق نیز چنین استنباط می‌شود که افزودن بیش از حد الیاف فولادی در مقطع بتن نمی‌تواند لزوماً منجر به افزایش مقاومت خمشی گردد، زیرا عدم تغییر و یا حتی افت محسوس این مقاومت در



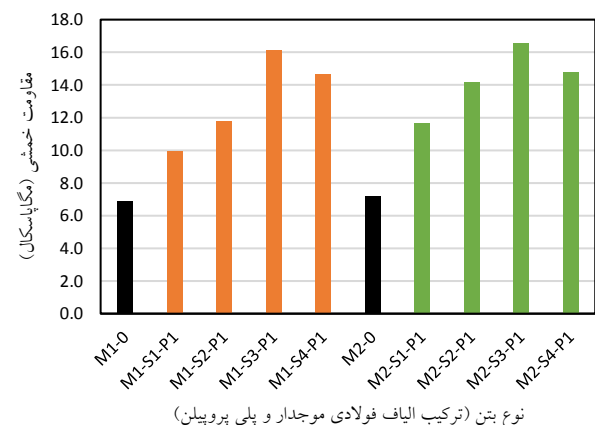
شکل ۱۸: مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی صاف



شکل ۱۹: مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی موجدار



شکل ۲۰: مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی‌پروپیلن



شکل ۲۱: مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی موجدار و پلی‌پروپیلن

الیاف (چه صاف و چه موجدار) در مقایسه با رشدی که در مقاومت کششی دونیم شدن ایجاد شد، اندکی بیشتر است. طبق شکل (۲۱) دیده می‌شود که در بین تمام طرح‌ها بهبود بهینه در مقاومت خمشی جایی رخ می‌دهد که الیاف فولادی موجدار با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن ترکیب شوند، در این حالت در طرح مخلوط ۱ مقاومت خمشی به ۱۶/۱ مگاپاسکال و در طرح مخلوط ۲ به ۱۶/۶ مگاپاسکال رسید. در واقع می‌توان دید جایی که الیاف فولادی به مرز بهینه خود رسیده است با افزودن الیاف پلی پروپیلن به مقطع بتنی می‌توان فاصله خالی موجود بین الیاف‌های فولادی را با الیاف دیگری پر کرد، لذا فضای بتن مسلح نشده کمتر شده و عملاً فاصله میان الیاف‌ها کمتر خواهد شد و الیاف‌های بیشتری باعث دوخته شدن ترک‌های موجود درون بتن می‌شوند [48]. این امر باعث می‌شود تا پیوستگی بیشتری بین الیاف و ماتریس ایجاد شود و کنترل مؤثرتری در توسعه ترک‌های خمشی در مقطع بتنی صورت گیرد [49]. این میزان رشد نشان می‌دهد که از ترکیب مناسب الیاف فولادی موجدار (۳٪) با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن می‌توان ۱۳۱٪ تا ۱۳۳٪ در مقایسه با بتن مرجع (بدون هرگونه الیاف) منجر به رشد مقاومت خمشی شد. همان‌طور که چویی و همکاران (Choi et al.) بیشترین مقاومت خمشی کسب شده در تحقیق خود را ۱۶/۸۶ مگاپاسکال عنوان کردند [50]، مشابه نتایج کسب شده در این تحقیق، تنگ و همکاران (Teng et al.) رشد ۱۶۱٪ در مقاومت خمشی نسبت به بتن مرجع را مشاهده کردند [51].



شکل ۲۲ توزیع نامتقارن الیاف فولادی در مقطع بتنی

از مقایسه شکل‌های (۱۸) و (۲۰) دیده می‌شود که با افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف در طرح مخلوط ۱، مقاومت خمشی برای جایگزینی‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ از الیاف فولادی صاف به ترتیب ۲۰٪، ۴۷٪، ۲۸٪ و ۱۵٪ رشد کرده است (متوسط ۲۸٪) که این میزان در طرح مخلوط ۲ به ترتیب معادل ۱۶٪، ۴۷٪، ۳۱٪ و ۴۱٪ (معادل متوسط ۳۴٪) است. به هر حال این میزان از رشد مقاومت را می‌توان ناشی از وجود الیاف پلی پروپیلن دانست، زیرا طبق شکل (۲۳) الیاف پلی پروپیلن توانستند تا بخشی از ماتریس سیمانی را که توسط الیاف فولادی مسلح نشدند، پوشش دهد و به شکل مطلوبی دو سر دهانه شکسته شده را با استفاده از پل‌سازی‌های مناسب به هم بدوزد. می‌توان دید که میزان رشد مقاومت خمشی در بتن‌های ساخته شده در اثر اضافه کردن



(ب) جدا شدن الیاف فولادی از مقطع ترک و ادامه پل‌بندی مقطع توسط الیاف پلی پروپیلن

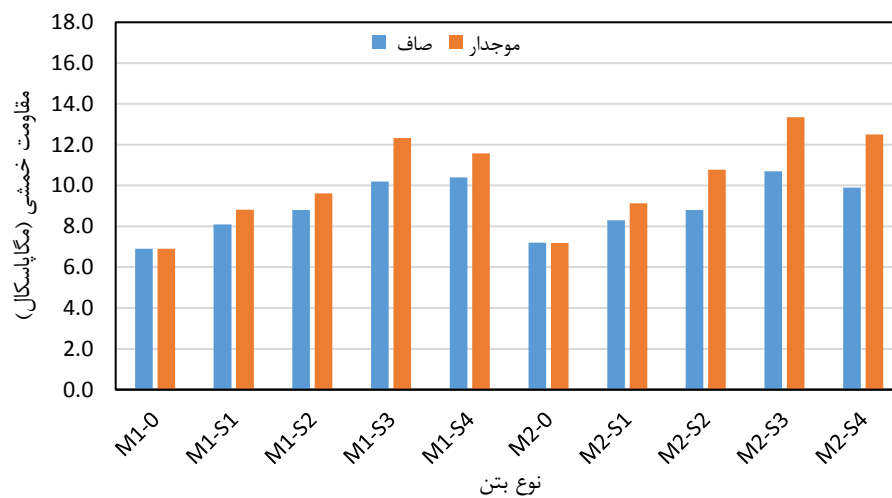


(الف) توزیع پیوسته و پل‌بندی مناسب الیاف پلی پروپیلن در دهانه ترک

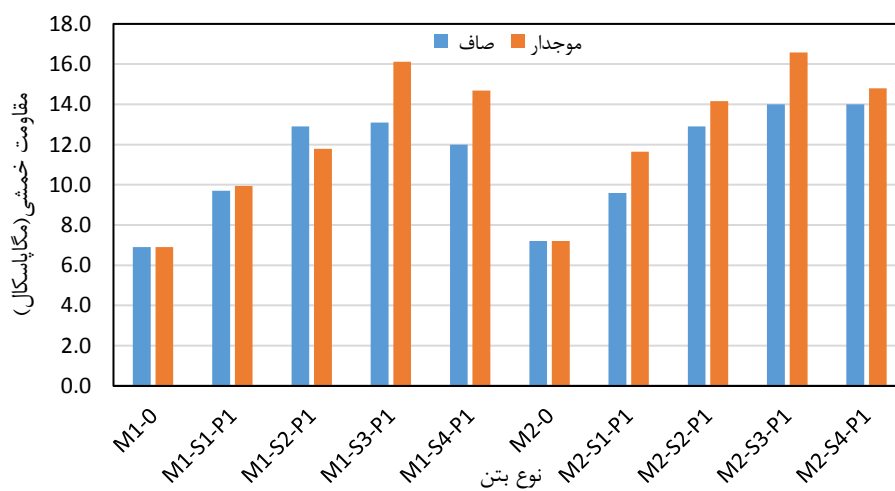
شکل ۲۳ مقطع شکسته شده نمونه خمشی حاوی ترکیب الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن

نباشد، تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار منجر به افزایش مقاومت خمشی خواهد شد. طبق نتایج کسب شده، متوسط این رشد در بتن‌های بدون و با الیاف پلی پروپیلن به ترتیب ۱۷٪ و ۱۲٪ است. مشابه این نتایج وو و همکاران (Wu et al.) نیز نشان دادند که در مقایسه با الیاف صاف، استفاده از الیاف موجدار می‌تواند تأثیر بهتری در بهبود مقاومت خمشی داشته باشد. آن‌ها این نتیجه را متأثر میزان ظرفیت مقاومت پیوستگی متفاوت الیاف‌ها با شکل‌های مختلف بیان کردند [52].

بررسی تأثیر شکل الیاف. شکل‌های (۲۴) و (۲۵) نشانگر مقایسه تأثیر نوع الیاف فولادی صاف و موجدار در مقاومت خمشی هستند. در مجموع استفاده از الیاف موجدار باعث شده تا در مقایسه با الیاف صاف مقاومت خمشی افزایش یابد. این تأثیر افزایشی هم در حالتی که مقطع بتنی عاری از الیاف پلی پروپیلن و هم در حالتی که دارای ۱٪ الیاف پلی پروپیلن است، مشهود است. می‌توان دید که در هر دو طرح مخلوط ۱ و ۲، بدون توجه به اینکه مقطع حاوی الیاف پلی پروپیلن باشد یا



شکل ۲۴ مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ فقط با الیاف فولادی



شکل ۲۵ مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن

نتایج

در این پژوهش خواص مکانیکی بتن‌های توانمند حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن به صورت جداگانه و همزمان تحت مطالعه قرار گرفت. نتایج کلیدی به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

۱. در درصد خاصی از مصرف الیاف فولادی (۳٪)، تأثیر مخرب کاهش حجم ماتریس سیمانی ناشی از افزودن الیاف فولادی، بیشتر از تأثیر مثبت عملکرد الیاف فولادی در افزودن مقاومت فشاری است.
۲. افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف و موجدار باعث شد تا مقاومت فشاری به اندازه (۷-۸)٪ رشد کند.
۳. تأثیر تغییر شکل الیاف فولادی از صاف به موجدار در بهبود مقاومت فشاری کم و حدود ۲٪ ثبت شد.
۴. افزایش میزان الیاف فولادی صاف و موجدار تا ۳٪ باعث شد تا مقاومت کششی دونیم شدن در طرح مخلوط ۱ به ترتیب ۴۴٪ و ۸۱٪ رشد کند. این افزایش در طرح مخلوط ۲، معادل ۴۹٪ و ۸۰٪ ثبت شد.
۵. در اثر افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۳٪ الیاف فولادی موجدار، بیشترین مقاومت کششی دونیم شدن معادل

- ۱۳/۷ مگاپاسکال حاصل شد. تأثیر بهبودبخشی الیاف پلی پروپیلن معادل ۲۵٪ بوده است.
۶. تأثیر تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار در بهبود مقاومت کششی دونیم شدن بین (۲۲-۲۰)٪ بود. این افزایش مستقل از نوع طرح مخلوط بوده است.
۷. آنچه که بیشتر از میزان الیاف در بهبود مقاومت خمشی و یا حتی مقاومت کششی دونیم شدن مؤثر بوده است، نحوه توزیع و استقرار الیاف درون مقطع بتنی است.
۸. افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث شد تا مقاومت خمشی به طور متوسط در بتن‌های حاوی الیاف صاف ۲۸٪ و در بتن‌های حاوی الیاف موجدار ۳۴٪ رشد کند.
۹. تغییر شکل الیاف فولادی از صاف به موجدار در بتن‌های بدون الیاف پلی پروپیلن ۱۷٪ و در بتن‌های با الیاف پلی پروپیلن ۱۲٪ منجر به رشد مقاومت خمشی شد.

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] E. F. O'Neil, B. D. Neeley, and J. D. Cargile, "Tensile properties of very-high-strength concrete for penetration-resistant structures," *Shock and Vibration*, vol. 6, no. 5-6, pp. 237-245, 1999. <https://doi.org/10.1155/1999/415360>
- [2] B. A. Tayeh, B. A. Bakar, M. M. Johari, and Y. L. Voo, "Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete overlay," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 538-548, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013>
- [3] L. Mao and S. J. Barnett, "Investigation of toughness of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) beam under impact loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 99, pp. 26-38, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.09.014>
- [4] C. Wen, P. Zhang, J. Wang, and S. Hu, "Influence of fibers on the mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 52, p. 104370, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104370>
- [5] M. Amin, A. M. Zeyad, B. A. Tayeh, and I. S. Agwa, "Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 320, p. 126233, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126233>

- [6] A. E. Naaman and K. Wille, "The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress," in *Proceedings of Hipermat*, pp. 3–15, 2012.
- [7] A. M. Matos, S. C. Figueiredo, S. Nunes, E. Schlangen, and J. L. Barroso-Aguiar, "Durability of an UHPFRC under mechanical and chloride loads," *Construction and Building Materials*, vol. 311, p. 125223, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125223>
- [8] M. G. Sohail, R. Kahraman, N. Al Nuaimi, B. Gencturk, and W. Alnahhal, "Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101669, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101669>
- [9] A. M. Tahwia, G. M. Elgendy, and M. Amin, "Durability and microstructure of eco-efficient ultra-high-performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 303, p. 124491, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124491>
- [10] E. Brühwiler, "Structural UHPFRC: Welcome to the post-concrete era," *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, vol. 1, no. 1, 2016. <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.key>
- [11] D. Y. Yoo and N. Banthia, "Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 416–431, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.136>
- [12] N. Bertola, P. Schiltz, E. Denarié, and E. Brühwiler, "A review of the use of UHPFRC in bridge rehabilitation and new construction in Switzerland," *Frontiers in Built Environment*, vol. 155, 2021. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.769686>
- [13] E. Brühwiler and E. Denarié, "Rehabilitation of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete," in *UHPC-2008: The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, pp. 05–07, 2008.
- [14] H. Wibowo and S. Sriharan, "Use of ultra-high-performance concrete for bridge deck overlays," *IHRB Project TR-683*, 2018.
- [15] R. Ricciotti, R. Ricciotti, and P. Mazzacane, "The Enrico Navarra Gallery," *Designing and Building with UHPFRC*, pp. 79–86, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781118557839.ch6>
- [16] V. Perry and G. Weiss, "Innovative field cast UHPC joints for precast bridge decks: Design, prototype testing and projects," *Designing and Building with UHPFRC*, pp. 421–436, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781118557839.ch28>
- [17] P. Mazzacane, R. Ricciotti, G. Lamoureux, and D. Corvez, "Roofing of the stade Jean Bouin in UHPFRC," *Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, pp. 59–68, 2013.
- [18] Y. Huang, S. Grünwald, E. Schlangen, and M. Luković, "Strengthening of concrete structures with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review," *Construction and Building Materials*, vol. 336, p. 127398, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127398>
- [19] M. Schmidt, T. Leutbecher, S. Piotrowski, and U. Wiens, "The German guideline for ultra-high performance concrete," in *Proceedings of the FGC-ACI-fib-RILEM International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, pp. 2–4, 2017.

- [20] E. Brühwiler, "Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based composites (UHPFRC). Construction material, dimensioning and application," Lausanne, Switzerland, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400011>
- [21] N. Gowripalan and R. I. Gilbert, "Design guidelines for ductal prestressed concrete beams," Reference Article, University of New South Wales, 2000.
- [22] V. Perry and K. Habel, "Standardization of ultra-high performance concrete: The Canadian perspective," in *Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)*, 2017.
- [23] J. A. López, P. Serna, and J. Navarro-Gregori, "Advances in the development of the first UHPFRC recommendations in Spain: material classification, design and characterization," *UHPFRC, F. Toutlemonde and J. T. Ch. Resplendino, Eds.*, pp. 565–574, 2017.
- [24] F. JSCE, "Recommendations for design and construction of ultra-high strength fiber reinforced concrete structures (Draft)," Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 2004.
- [25] ASTM C109/C109M-07, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [26] ASTM C496/C496M-17, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [27] ASTM C1609/C1609M-19, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [28] A. Alsalman, C. N. Dang, and W. M. Hale, "Development of ultra-high performance concrete with locally available materials," *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 135–145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040>
- [29] A. Le Hoang and E. Fehling, "Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 790–806, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>
- [30] J. J. Park, D. Y. Yoo, G. J. Park, and S. W. Kim, "Feasibility of reducing the fiber content in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under flexure," *Materials*, vol. 10, no. 2, p. 118, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10020118>
- [31] M. Pourbaba, E. Asefi, H. Sadaghian, and A. Mirmiran, "Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 402–410, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.203>
- [32] R. Wang and X. Gao, "Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber," *Applied Sciences*, vol. 6, no. 8, p. 216, 2016. <https://doi.org/10.3390/app6080216>
- [33] J. Yang, B. Chen, and C. Nuti, "Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 302, p. 124104, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124104>

- [34] J. Esmaeili and A. O. AL-Mwanes, "A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 1958–1965, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>
- [35] J. Yu, B. Zhang, W. Chen, and J. He, "Experimental and multi-scale numerical investigation of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) with different coarse aggregate content and fiber volume fraction," *Construction and Building Materials*, vol. 260, p. 120444, 2020.
- [36] D. Y. Yoo, J. H. Lee, and Y. S. Yoon, "Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites," *Composite Structures*, vol. 106, pp. 742–753, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.033>
- [37] Z. Wu, C. Shi, W. He, and D. Wang, "Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements," *Cement and Concrete Composites*, vol. 79, pp. 148–157, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.010>
- [38] A. Alsaman, C. N. Dang, G. S. Prinz, and W. M. Hale, "Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 918–928, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>
- [39] N. Banthia, F. Majdzadeh, J. Wu, and V. Bindiganavile, "Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear," *Cement and Concrete Composites*, vol. 48, pp. 91–97, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>
- [40] P. Rashiddadash, A. A. Ramezani-pour, and M. Mahdikhani, "Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice," *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 313–320, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.087>
- [41] N. A. Libre, M. Shekarchi, M. Mahoutian, and P. Soroushian, "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 2458–2464, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058>
- [42] W. Meng and K. H. Khayat, "Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 4, p. 04018030, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002212)
- [43] A. Le Hoang and E. Fehling, "Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 790–806, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>
- [44] P. S. Song and S. Hwang, "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 9, pp. 669–673, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>
- [45] J. Yang, B. Chen, J. Su, G. Xu, D. Zhang, and J. Zhou, "Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.001>

- [46] A. Hu, X. Liang, J. Yu, and Q. Shi, "Tensile characteristics of ultra-high-performance concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 70, no. 6, pp. 314–324, 2018. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00126>
- [47] Y. Li, K. H. Tan, and E. H. Yang, "Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 169, pp. 629–637, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.105>
- [48] D. Y. Yoo, S. Kim, G. J. Park, J. J. Park, and S. W. Kim, "Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites," *Composite Structures*, vol. 174, pp. 375–388, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.069>
- [49] S. Abbas, A. M. Soliman, and M. L. Nehdi, "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 429–441, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>
- [50] W. C. Choi, K. Y. Jung, S. J. Jang, and H. D. Yun, "The influence of steel fiber tensile strengths and aspect ratios on the fracture properties of high-strength concrete," *Materials*, vol. 12, no. 13, p. 2105, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12132105>
- [51] S. Teng, V. Afroughsabet, and C. P. Ostertag, "Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 504–515, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.158>
- [52] Z. Wu, C. Shi, W. He, and L. Wu, "Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 103, pp. 8–14, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>