

## Examining the Impact of Steel and Polypropylene Fibers on the Mechanical Properties and Durability of High-Performance Concrete

Hamid Narakia, Seyed Fatholla Sajedi\*<sup>1</sup>, Masoud Paknahad<sup>2</sup>

1- Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2- Department of Civil Engineering, Mahallat Branch, Islamic Azad University, Markazi, Iran

### ABSTRACT

*This study examines the impact of various fiber combinations on the mechanical properties and durability of high-performance concrete. The concretes were made using siliceous aggregates (max size 9 mm) and a water-to-cement ratio of 0.23. Steel fibers in smooth and wavy shapes with an aspect ratio of 37.5 were added to improve mechanical properties and durability. To address the drawbacks of steel fiber-reinforced concrete, 1% polypropylene fibers were also incorporated. A total of 34 mix designs were prepared in 404 specimens of various shapes. Mechanical properties, including compressive and split tensile strengths, were measured at 28 days, while durability properties, including bulk electrical resistivity, water absorption, and accelerated chloride ion penetration, were evaluated over 180 days. Results showed that 3% wavy steel fibers and 1% polypropylene fibers yielded concrete with a split tensile strength of 13.7 MPa. Changing the steel fibers from smooth to wavy had minimal impact on compressive strength but increased split tensile strength by up to 22%. Polypropylene fibers, when combined with 1% steel fibers, reduced water absorption by 25% and reduced absorption by up to 45% in concretes with 2% to 4% steel fibers. The combination of steel and polypropylene fibers reduced porous spaces and improved cohesion and integrity, as demonstrated by the low chloride ion penetration and high electrical resistivity, indicating low corrosion risk. These findings were confirmed by microstructural analysis, showing enhanced cohesion in the transition zone and cement matrix.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 21 September 2024

**Revise Date:** 01 December 2024

**Accept Date:** 17 February 2025

### Keywords:

*High-Performance Concrete, Mechanical properties, Steel fibers, Polypropylene fibers, micro-silica.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.479686.3525

\*Corresponding author:

Email address:

## بررسی تاثیر الیاف های فولادی و پلی پروپیلن بر ویژگی های مکانیکی و دوام بتن های توانمند

حمید نارکی<sup>۱</sup>، سید فتح اله ساجدی<sup>۲</sup>، مسعود پاک نهاد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، ایران  
۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، ایران  
۳- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات، ایران

### چکیده

مقاله حاضر به بررسی تاثیر ترکیب الیاف های مختلف بر ویژگی های مکانیکی و دوام بتن های توانمند پرداخته است. بتن های ساخته شده با استفاده سنگدانه های سیلیسی با حداکثر اندازه ۹ میلی متر و نسبت آب به سیمان ۰/۲۳ ساخته شدند. برای بهبود خواص مکانیکی و دوام آن ها، الیاف های فولادی در دو شکل صاف و موجدار با نسبت ظاهر ۳۷/۵ به بتن ها اضافه شدند. جهت رفع برخی معایب بتن های حاوی الیاف فولادی، ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن های ساخته افزوده شد. ۳۴ طرح مخلوط در قالب ۴۰۴ آزمون به اشکال مختلف ساخته شد. خواص مکانیکی شامل مقاومت های فشاری، کششی دونیم شدن در مدت ۲۸ روزه و خواص دوام شامل مقاومت الکتریکی حجمی، جذب آب غوطه وری و نفوذ تسریع شده یون کلراید در مدت ۱۸۰ روزه انجام شدند. نتایج نشان دادند که ۳٪ الیاف فولادی موجدار و ۱٪ الیاف پلی پروپیلن منجر به ساخت بتن با مقاومت کششی دونیم شدن ۱۳/۷ مگاپاسکال شد. تغییر شکل الیاف فولادی از صاف به موجدار در تغییر مقاومت فشاری نامحسوس و در مقاومت کششی دونیم شدن تا ۲۲٪ ثبت شد. الیاف پلی پروپیلن نشان داد در ترکیب با ۱٪ الیاف فولادی ۲۵٪ جذب آب غوطه وری را کاهش می دهد و قادر است تا جذب آب غوطه وری را به طور متوسط تا ۴۵٪ در سایر بتن های حاوی ۲٪ تا ۴٪ الیاف فولادی کاهش دهد. تاثیر کاهش فضاهای متخلخل و ایجاد انسجام و یکپارچگی در بتن های ساخته شده در اثر ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن جایی ثبت شد که آزمون های مقاومت الکتریکی حجمی و نفوذ پذیری تسریع شده یون کلراید نشان دادند که بتن های ساخته شده در معرض احتمال خوردگی میلگرد نبوده و احتمال نفوذ یون کلراید در همگی آن ها کم و یا بسیار کم است. انسجام ریز ساختار بتن های الیافی در ناحیه انتقال و در ساختار ماتریس سیمانی آن ها در تصویر برداری های الکترونی نیز نتایج ذکر شده را تایید نمود.

کلمات کلیدی: بتن توانمند، خواص مکانیکی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، دوده سیلیس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.479686.3525	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.479686.3525	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۱/۲۹	۱۴۰۳/۱۱/۲۹	۱۴۰۳/۰۹/۱۱	۱۴۰۳/۰۶/۳۱
سیدفتح اله ساجدی f_sajedi@yahoo.com				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

به طور کلی بتن‌های با مقاومت فشاری بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال را می‌توان در دسته بتن‌های پرمقاومت قرار داد. علی‌رغم مقاومت فشاری بالا، یکی از ویژگی‌های محدود کننده این دسته از بتن‌ها نسبت به بتن‌های معمولی، مقاومت کششی نه‌چندان زیاد، انعطاف‌پذیری کم و گسیختگی آنی آن‌ها است [1-3]. با این حال با وجود برخی از موانع، با بکارگیری برخی مواد افزودنی و اضافه کردن برخی اجزا به بتن مانند الیاف مختلف، می‌توان با افزایش مقاومت کششی، از گسیختگی ترد و شکنندگی آن‌ها کاست. این دسته از بتن‌ها با ویژگی‌های ارتقا یافته، حاصل ترکیب مقادیر زیادی سیمان و مواد پایه سیمانی، ماسه سیلیسی، فوق روان‌کننده و کاهش حداکثر اندازه و یا حذف درشت‌دانه سنگی هستند که مقاومت فشاری آن‌ها گاهی فراتر از ۱۲۰ مگاپاسکال نیز می‌رسد [۴]. ویژگی‌های این دسته از بتن‌ها به میزان زیادی تحت تاثیر مقدار و نوع الیاف‌های استفاده شده در آن است. در کنار آن، بکارگیری ترکیبی از الیاف مختلف می‌تواند تاثیر بیشتری در ارتقای این ویژگی‌های داشته باشد. استفاده همزمان بیش از یک نوع الیاف می‌تواند این حقیقت را نشان دهد که یک گونه خاص از الیاف می‌تواند باعث ارتقا عملکرد گونه دیگری از الیاف شود. به این ترتیب که هر نوع الیاف می‌تواند در بتن تامین‌کننده ویژگی‌های باشد که توسط الیاف دیگری تامین نمی‌شود [5-7]. ترکیب موثر استفاده همزمان بیش از یک نوع الیاف جایی خود را به شکل مطلوبی نشان می‌دهد که افزایش مقاومت در برابر وقوع ترک اولیه و نیز مقاومت نهایی بتن توسط الیافی که سخت‌تر و مقاوم‌تر است تامین گردد، در حالی که الیاف نوع دیگر، تامین‌کننده انعطاف‌پذیری و کرنش‌پذیری و طاقت بتن باشد [8-10].

الیاف فولادی باعث می‌شود تا مکانسیم بروز ترک و متعاقباً گسیختگی بتن تحت کنترل قرار گیرد و حتی می‌توان با رعایت الزاماتی، با استفاده از این نوع الیاف از وقوع ترک جلوگیری کرد [11-12]. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه عوامل اثرگذار بر ویژگی‌های بتن‌های پرمقاومت صورت گرفته است. بررسی تاثیر دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری [13]، تاثیر تغییر مقدار الیاف فولادی بر مقاومت کششی [14]، مقایسه تاثیر مصرف جداگانه الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن [15] را می‌توان از این دسته مطالعات نام برد. یکی از مباحثی که امروزه بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است، بررسی تاثیر متقابل استفاده از الیاف‌های گوناگون بر یکدیگر است. با این حال منابع در این زمینه از محدودیت بیشتری برخوردار بوده و نظرات محققان در رابطه با برخی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های پرمقاومت حاوی الیاف ترکیبی یکسان نیست. دامنه تحقیقات موجود بیشتر متوجه مقاومت‌های مکانیکی می‌باشد با این حال امروزه به دلیل گسترش کاربرد این دسته از بتن‌ها، بررسی آزمایش‌هایی مانند تعیین میزان تخلخل، جذب آب و ضریب ارتجاعی نیز در دستورکار قرار گرفته است [9,16].

ازبک‌اوغلو و افروغ ثابت (۲۰۱۵) خواص مکانیکی و دوام بتن‌های پرمقاومت حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن را در درصدهای مختلف جایگزینی این الیاف‌های مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب الیاف فولادی و مواد افزودنی می‌تواند به شکل قابل ملاحظه‌ای باعث ارتقای خواص مکانیکی و طاقت بتن شود [8]. چویی و همکاران (۲۰۱۹) در آزمایش‌های خود بر بتن‌های پرمقاومت حاوی الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن بیان کردند که الیاف فولادی باعث می‌شود تا مقاومت خمشی و کششی، طاقت و انعطاف‌پذیری بتن به میزان زیادی تحت تاثیر گیرد، لذا مکانسیم وقوع ترک تحت تاثیر قرار گرفته و با کاهش مقدار و اندازه ترک‌ها، دوام این دسته از بتن‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، بکارگیری الیاف پلی‌پروپیلن باعث شد تا جمع‌شدگی خمیری و مقاومت در برابر ضربه به میزان مطلوبی بهبود یابد [11]. در واقع ترکیب الیاف‌های فولادی با مقاومت و ضریب ارتجاعی بالا و شکل‌پذیری کم با الیاف پلی‌پروپیلن با مقاومت و ضریب ارتجاعی کم و شکل‌پذیری بالا، باعث شده تا نقطه ضعف یکی توسط نقطه قوت دیگری پوشیده گردد. در مقابل طباطبائیان و همکاران با ترکیب دو الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی با کاهش جزیبی در مقاومت فشاری نیز مواجه شدند [17].

در کنار تمام موفقیت‌هایی که امروزه در سرتاسر دنیا در زمینه ساخت بتن‌های پرمقاومت الیافی روی داده است، همچنان موانع زیادی در رابطه با کاربرد این بتن‌ها دیده می‌شود. تلاش‌های زیادی در زمینه پر کردن شکاف‌های تحقیقاتی به ویژه در زمینه مقرون به صرفه‌تر کردن این بتن‌ها و نیز شناخت ریزساختار و دوام آن‌ها در شرایط محیطی مختلف انجام شده است [21-17]. در زمینه تعیین خواص وابسته به دوام بتن‌های پرمقاومت الیافی حاوی الیاف ترکیبی برخی از نتایج نشان از تاخیر در وقوع فرآیندهای خوردگی و زوال بتن دارند [22]، با این حال به دلیل اینکه پدیده دوام تحت تاثیر عوامل متعدد بوده، لذا لازم است تا در این زمینه مطالعات بیشتری صورت گیرد. در کنار آن، تغییر در ریزساختار بتن‌های پرمقاومت الیافی و تحت تاثیر قرار گرفتن ناحیه انتقال بین سنگدانه‌ها و ماتریس سیمانی و نیز معرفی ناحیه انتقال جدید بین الیاف و ماتریس سیمانی [23]، یکی دیگر از پدیده‌های است که همزمان خواص مکانیکی و دوام این بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا لازم است تا در کنار بررسی خواص دوام این بتن‌ها، ریزساختار آن‌ها نیز مورد شناسایی قرار گیرد. کمبود اطلاعات در این زمینه نیاز به بررسی همزمان تاثیر ریزساختار بر خواص مکانیکی و دوام این بتن‌ها را بیشتر می‌کند.

هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر ترکیب همزمان الیاف پلی‌پروپیلن با الیاف فولادی در اشکال مختلف و درصد‌های جایگزینی گوناگون بر بتن‌های پرمقاومت بوده است. بتن‌های توانمند ساخته شده با هدف حداقل کسب مقاومت کششی بیشتر از ۱۰ مگاپاسکال با استفاده از سنگدانه‌های سیلیسی ساخته شده است. عوامل گوناگونی مانند تاثیر شکل الیاف فولادی، مقدار آن و ترکیب آن با الیاف پلی-پروپیلن مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به یک تحلیل قابل استناد، آزمایش‌های مختلفی در زمینه خواص مکانیکی در سن ۲۸ روزه شامل مقاومت‌های فشاری، کششی دونیم‌شدن انجام شد. آزمایش‌های وابسته دوام نیز شامل جذب آب غوطه‌وری، مقاومت الکتریکی و نفوذ تسریع شده یون کلراید در سن ۱۸۰ روزه انجام گردید. برای شناسایی دقیق‌تر تاثیر ریزساختار ناحیه انتقال بین الیاف‌های استفاده شده و ماتریس سیمانی نیز از تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی استفاده گردید.

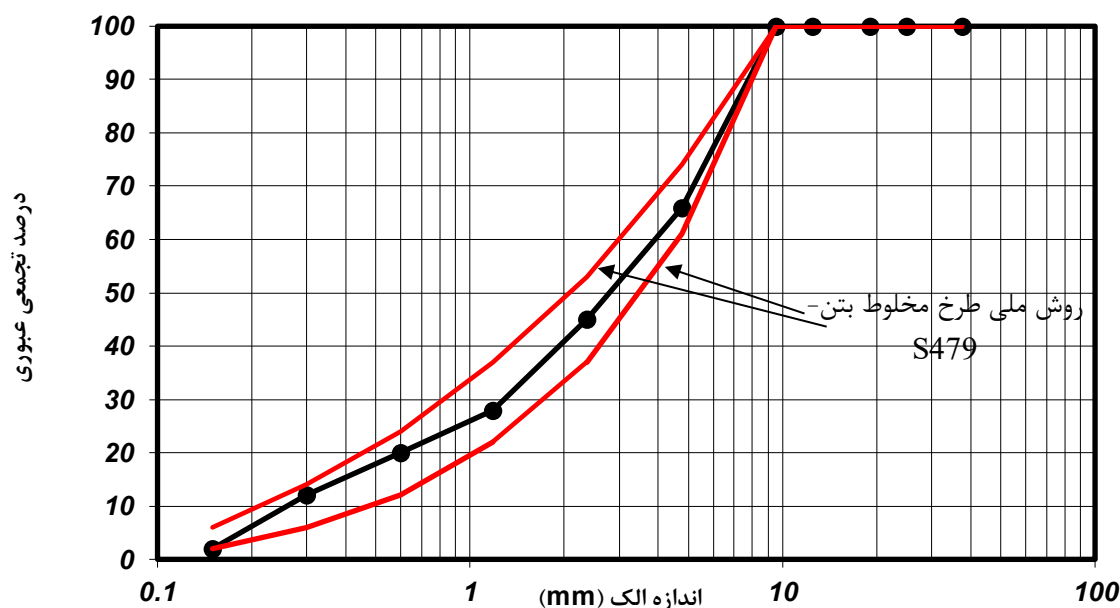
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

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 و دوام مطلوب‌تر اقدام به جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس شد. برای دستیابی به بتن با کارایی مطلوب و کاهش اثرات نامطلوب در روانی ناشی از دوده سیلیس، از فوق روان‌کننده با پایه پلی‌کربکسیلات استفاده شد. به منظور ارتقای سطح کیفی بتن‌های توانمند و دستیابی به مقاومت کششی بالا، از دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن 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 و دوام این بتن‌ها و پوشش برخی از نقاط ضعف الیاف فولادی مانند عدم توزیع یکنواخت درون بتن، کاهش کارایی و مقرون به صرفه نبودن آن، در طرح‌های جداگانه‌ای، ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی اضافه شد. در مجموع 404 عدد آزمون مکعبی و استوانه‌ای در قالب 34 طرح مخلوط مختلف ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری براساس استاندارد ASTM C 109 [24]، مقاومت کششی دونیم‌شدن براساس استاندارد ASTM C 496 [25]، جذب آب غوطه‌وری براساس استاندارد ASTM C 642 [27]، مقاومت الکتریکی براساس استاندارد ASTM C 1014 و نفوذ تسریع شده یون کلراید براساس استاندارد ASTM C1202 [28] بر آزمون‌ها انجام شدند. برای کسب اطلاعات دقیق‌تر از عملکرد الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن و نیز تحلیل ریزساختار بتن‌های ساخته شده، از نواحی انتقال، تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی شد.

## ۲-۱- مواد و مصالح

## ۱-۱-۲- 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 مربوطه 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 نشانگر دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده می‌باشد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی‌متر

## ۱-۲- مواد سیمانی

سیمان استفاده شده در طرح مخلوط‌ها از نوع ۲ مربوط به کارخانه سیمان رامهرمز واقع در استان خوزستان بوده و در راستای دستیابی به بتن با مقاومت بالا، دلیل تاثیر مثبت دوده سیلیس بر مقاومت فشاری و دوام آن از جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس استفاده گردید. ترکیبات شیمیایی هر یک از مواد سیمانی و همین‌طور سنگدانه‌های سیلیسی ارائه شده توسط تامین کنندگان هر محصول در جدول ۱ قرار داده شده است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی و سنگدانه‌های مصرفی در تحقیق

LOI	SO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ماده
۲/۲۰	۲/۱۳	۲/۰۱	۶۴/۳۴	۶/۱۰	۳/۷۰	۲۱/۲۸	سیمان
-	۰/۱۰	۰/۹۷	۰/۴۹	۱/۲۳	۰/۸۷	۹۴/۷۳	دوده سیلیس
-	-	۰/۰۰۲۵	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۰۳	۹۹/۲۰	سنگدانه‌های سیلیسی

## ۳-۱-۲- آب و مواد افزودنی

آب استفاده شده در ساخت مخلوطها و عمل آوری آزمونها آب شرب اهواز بود و برای دستیابی به روانی مطلوب از فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات اثر به میزان ۱/۸٪ وزن مواد سیمانی استفاده شده است.

## ۴-۱-۲- الیاف

الیافهای استفاده شده در دو دسته فولادی و پلی پروپیلن استفاده گردیدند. الیاف فولادی با طول ۳۰ میلی متر و قطر ۰/۸ میلی متر با نسبت ظاهری ۳۷/۵ و مقاومت کششی ۱۱۰۰ مگاپاسکال استفاده شدند. برای بررسی تاثیر شکل الیاف، الیاف فولادی در دو شکل صاف دو سر خم و موجدار دو سر خم استفاده شد و برای بررسی تاثیر میزان الیاف، جایگزینیهای ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ حجمی این دو نوع الیاف به کار برده شدند. از آنجایی که در توزیع نامناسب الیاف فولادی امکان بروز ناپیوستگی در ماتریس سیمانی افزایش یافته و این امر منجر به بروز تنشهای غیر یکنواخت داخلی درون بتن می شود، جهت کاهش این اثر مخرب از الیاف پلی پروپیلن به طول ۲۵ میلی متر با مقاومت کششی ۴۰۰ مگاپاسکال به میزان ۱٪ حجمی در ساخت مخلوطها نیز استفاده شد.

## ۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل آوری آزمونها و نامگذاری آنها

جدول ۲ نشانگر دو طرح مخلوط M1 و M2 به عنوان طرح مخلوطهای استفاده شده هستند. برای بهبود عملکرد بتن ساخته شده، اندازه سنگدانهها کاهش و مقدار سیمان و دوده سیلیس افزایش یافته، در حالی که نسبت آب به سیمان به ۰/۲۳ کاهش پیدا کرد. برای کارایی بهتر، از ۱/۸٪ فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات اثر استفاده شد. ابتدا سنگدانهها و سیمان مخلوط شده و سپس دوغاب آب، فوق روان کننده و دوده سیلیس به آن اضافه شدند. پس از آن، الیاف به مخلوط افزوده و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شد. همان طور که در شکل ۲ دیده می شود آزمونهای مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری و الکتریکی، و آزمونهای استوانه‌ای برای آزمایش کشش دو نیم شدن استفاده شدند. همچنین، آزمایشهای جذب آب و نفوذ تسریع شده یون کلراید روی آزمونهای دیسکی انجام گرفت. ساختار نمایهها به گونه‌ای است که نمایه M بیانگر طرح مخلوط، S نشانگر الیاف فولادی و P نشانگر الیاف پلی پروپیلن می باشد.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاطهای تحقیق (kg/m<sup>3</sup>)

عنوان طرح	سیمان	مصالح سنگی	آب (لیتر)	دوده سیلیس	فوق روان کننده	نسبت آب به مواد سیمانی
M1	960	700	300	330	23	۰/۲۳
M2	850	900	270	300	21	۰/۲۳



ج) مقاومت ویژه الکتریکی حجمی تک محوره



ب) مقاومت کششی دونیم‌شدن



الف) مقاومت فشاری



ه) نفوذ تسریع شده یون کلراید



د) آماده‌سازی برای جذب آب غوطه‌وری

شکل ۲- تصاویری از آزمایش‌های انجام شده روی آزمونه‌ها

### ۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

##### ۳-۱-۱- بررسی تاثیر نوع و میزان الیاف

شکل ۳ نشان می‌دهد که در طرح‌های مخلوط ۱ و ۲ بدون الیاف، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۸۱/۲ و ۸۷/۱ مگاپاسکال است. به نظر می‌رسد در بتن‌های با نسبت آب به سیمان یکسان، عامل اثرگذار در افزایش مقاومت فشاری، اندازه، نوع و مقدار سنگدانه مصرفی باشد که در مقایسه این دو طرح، مقدار سنگدانه سیلیسی در طرح دوم افزایش یافته است. افزودن الیاف فولادی صاف (۱٪ تا ۴٪)، مقاومت در طرح مخلوط ۱ به ترتیب ۶٪، ۱۴٪، ۲۸٪ و ۲۶٪ افزایش یافته، در حالی که در طرح مخلوط ۲ این افزایش به ترتیب ۵٪، ۱۹٪، ۲۰٪ و ۱۹٪ ثبت گردید. حداکثر مقاومت فشاری در هر دو طرح مخلوط (۱۰۴/۱ مگاپاسکال) با افزودن ۳٪ الیاف فولادی مشاهده شد، اما با افزایش مقدار الیاف به ۴٪، تغییر قابل توجهی در مقاومت مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که پس از یک مقدار مشخص، افزودن الیاف بیشتر، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد. برخی مطالعات نیز این موضوع را تأیید کرده‌اند [۲۹، ۳۰]. در حالی که سایر تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش الیاف فولادی به بهبود مقاومت فشاری کمک می‌کند [۳۱، ۳۲]. نتایج نشان داد که افزودن ۴٪ الیاف فولادی حتی ممکن است منجر به کاهش مقاومت شود. در این مورد، برخی پژوهش‌ها بیان می‌کنند که کاهش حجم ماتریس سیمانی تأثیر منفی بیشتری نسبت به افزایش مقاومت ناشی از الیاف فولادی دارد [۳۳]. همچنین، تجمع بیش از حد الیاف فولادی می‌تواند منجر به افزایش احتمال گلوله‌ای شدن الیاف‌ها شود که تأثیر منفی بر مقاومت فشاری دارد [۳۴].

در طرح‌های مخلوط ۱ و ۲ که از الیاف فولادی موجدار استفاده شده، رفتار مشابهی مشاهده شد (شکل ۴). در طرح مخلوط ۱، افزودن الیاف باعث افزایش ۷٪ تا ۲۶٪ در مقاومت فشاری شد و در طرح مخلوط ۲ این میزان ۹٪ تا ۲۲٪ ثبت شد. با این حال، در هر دو طرح، افزایش الیاف فولادی موجدار پس از ۳٪ تأثیر منفی بر مقاومت فشاری داشت. یو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) نیز معتقدند که با افزایش

<sup>۱</sup> Yu et al.

مقدار الیاف فولادی از ۰٪ تا ۵٪، مقاومت فشاری افزایش یافته 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 تاثیر 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<sup>۲</sup> (۲۰۱۳)، وو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) و نیز السلمان و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) 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 ۵ به بررسی تأثیر ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن پرداخته است. همان‌طور که دیده می‌شود افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف باعث شد تا بازه رشد مقاومت فشاری بیشتر شود. در طرح مخلوط ۱، این رشد بین ۸٪ تا ۳۷٪ و در طرح مخلوط ۲ بین ۷٪ تا ۲۸٪ ثبت شد. به عنوان مثال، در طرح مخلوط ۱ با ۳٪ الیاف فولادی، افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت از ۱۰۴/۱ به ۱۱۱/۵ مگاپاسکال شد (رشد ۷٪). این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث می‌شود تا بخش‌های ماتریس سیمانی بتنی که عاری که از الیاف پلی پروپیلن است، به شکل مطلوبی تسلیح شده و ظرفیت تنش‌پذیری بتن را افزایش می‌دهد. در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن به ماتریس سیمانی بتن حاوی الیاف فولادی، توزیع بار یکنواخت‌تر شده و این امر باعث می‌شود تا نقاط ضعف درون بتن کاسته شده و مقاومت فشاری با رشد بیشتری مواجه شود. [۳۹]. از طرف دیگر در مقایسه با الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن در کاهش ترک‌های مرحله خشک شدن بتن کمک بیشتری می‌کند که با کاهش وقوع این ترک‌ها، بتن رشد مقاومت بیشتری نسبت به حالتی که بدون این الیاف است را از خود نشان می‌دهد. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که افزودن ترکیبی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن می‌تواند مقاومت بتن را بهبود بخشد، اما این بهبود پس از مقدار معینی الیاف فولادی کاهش می‌یابد [۴۰، ۴۱]. در شکل ۷ می‌توان 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 تایید نتایج کسب شده بالا، منگ و خیاط<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) و نیز لی‌هونگ و فلینگ<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) 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 [42,43].

<sup>2</sup> Yoo et al.

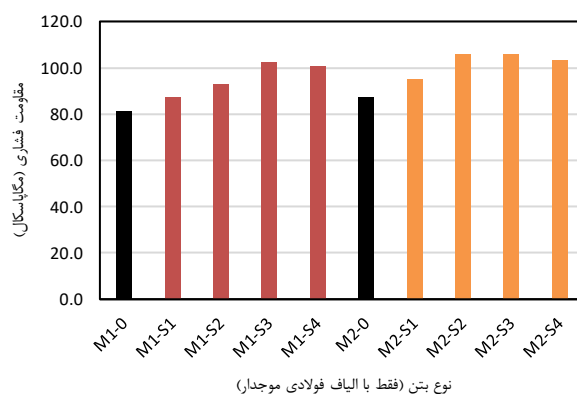
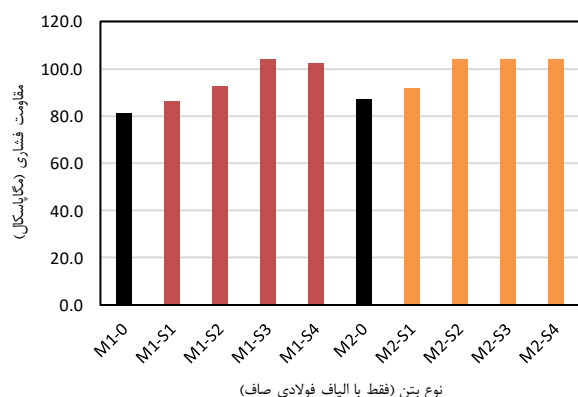
<sup>3</sup> Wu et al.

<sup>4</sup> Alsalman et al.

<sup>5</sup> Meng and Khayat

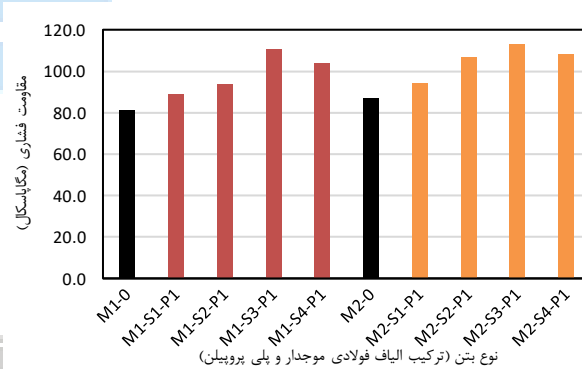
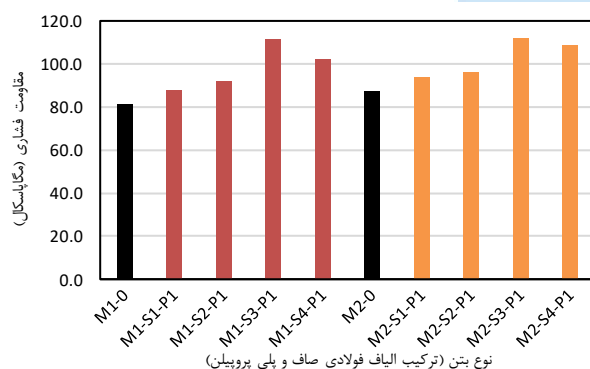
<sup>6</sup> Hoang and Fehling





شکل ۳- مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی صاف

شکل ۴- مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی موجدار



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

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

در شکل ۶ رفتار نزولی مقاومت فشاری در جایگزینی پس از ۳٪ الیاف فولادی موجدار دیده می‌شود. میزان بازه رشد مقاومتی در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن 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 موجدار ساخته شده باشند، در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن، با یک بازه رشد مقاومتی مشابه مواجه می‌شوند. همچنین تاثیر به‌کارگیری الیاف پلی پروپیلن را در مقایسه نتایج در اشکال ۴ و ۶ می‌توان دید، جایی که در جایگزینی بهینه ۳٪ الیاف فولادی موجدار در طرح مخلوط ۱، افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن 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 پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی صاف و موجدار، باعث می‌شود تا مقاومت فشاری به اندازه (۷-۸)٪ رشد نماید.

## ۲-۱-۳- بررسی تاثیر شکل الیاف

از مقایسه شکل‌های ۳ تا ۶ می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که استفاده از الیاف فولادی موجدار 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٪ می‌باشد، با این حال استثنائاتی نیز مشاهده می‌شود که در آنها مقاومت فشاری در اثر استفاده از الیاف موجدار به جای الیاف صاف، تاثیر محسوسی از خود نشان نداده است. با بررسی شکل‌ها تاثیر نوع الیاف فولادی موجدار و صاف بر مقاومت فشاری در طرح مخلوط‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن دیده می‌شود که در مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن به صورت همزمان نیز تغییرات در شکل الیاف تاثیر محسوسی در مقاومت از خود نشان نداده است و بازه تغییرات آن به نحوی بوده که در هر دو حالت کاربرد الیاف موجدار و یا الیاف صاف بعضاً با رشد و یا افت جزئی مقاومت نسبت به حالت دیگر مواجه شده است.

## ۳-۲- مقاومت کششی دونیم‌شدن

### ۳-۲-۱- بررسی تاثیر نوع و میزان الیاف

در آزمون‌های بدون الیاف فولادی، مقاومت کششی بتن به ۵/۷ مگاپاسکال رسیده است. این میزان از مقاومت برای بتن عاری از الیاف نشان‌دهنده 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 تامین این مقاومت کششی بی‌تاثیر نمی‌باشد. به طور کلی در تمام اشکال ۷ تا ۱۰ دیده می‌شود که با افزایش میزان الیاف فولادی مقاومت کششی نیز افزایش یافته است. به طور نمونه، در اشکال ۷ و ۸ 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٪ رسیده است. سونگ و هوانگ<sup>۷</sup> (2004) 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]. به‌طور کلی یانگ و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۲۲) معتقدند که در اثر افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی به شکل مطلوبی افزایش می‌یابد اما چنانچه مقدار الیاف از حد معینی افزایش یابد، رشد مقاومت کششی نیز رو به کاهش خواهد رفت. با این حال آن‌ها معتقدند که این مقدار معین، همیشه یک عدد ثابت نبوده و می‌تواند تابع شرایط مختلف باشد [45]. در همین راستا وو و همکاران<sup>۹</sup> (2018) این مقدار بهینه را ۵٪، منگ و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۸) این مرز را ۳٪ و حتی لی و همکاران<sup>۱۱</sup> (2018) 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 رشد 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 (۲۰۱۸) نشان دادند وقتی که الیاف از مقدار معینی بیشتر شود، تاثیرات نامناسب آن از تاثیرات مثبت عملکردی آن پیشی می‌گیرد لذا مقاومت کششی نمی‌تواند دیگر با افزایش مقدار الیاف بیشتر شود [47]. مشهود است که نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن در طرح مخلوط ۲، نسبت به نتایج مشابه در طرح مخلوط ۱ بیشتر هستند. لذا از منظر مولفه مقاومت کششی دونیم‌شدن، می‌توان طرح مخلوط ۲ را به عنوان طرح بهینه معرفی کرد.

<sup>7</sup> Song and Hwang

<sup>8</sup> Yang et al.

<sup>9</sup> Hu et al.

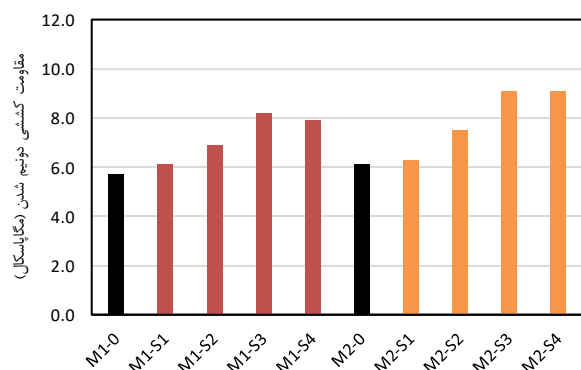
<sup>10</sup> Meng et al.

<sup>11</sup> Li et al.

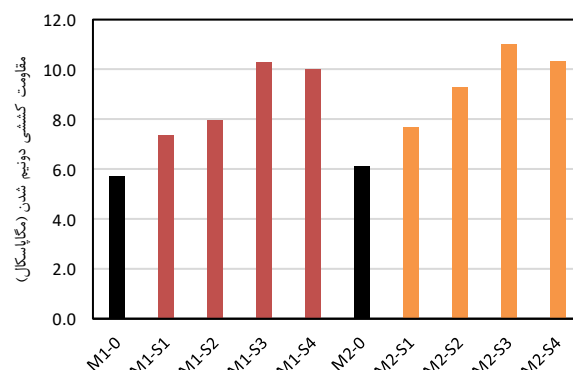
با مقایسه نتایج کسب شده از اشکال ۹ و ۱۰ مربوط به بتن‌های حاوی ترکیب الیاف فولادی صاف و موجدار با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن، می‌توان دید که مقاومت کششی مرتب رو به افزایش است. لذا در هر درصدی از جایگزینی الیاف فولادی (چه صاف و چه موجدار) می‌توان اثر مثبت استفاده از الیاف پلی پروپیلن را دید. در شکل ۹، در طرح 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٪ الیاف فولادی صاف به ۲۵٪ رسیده است. مشابه این رفتار نیز در رشد ۲۰٪ مقاومت کششی دونیم شدن در طرح مخلوط ۲، در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن به ۳٪ الیاف فولادی صاف نیز مشهود می‌باشد. در شکل ۱۰، بیشترین میزان مقاومت کششی دونیم شدن برای بتن ساخته شده از طرح مخلوط ۲ حاصل شده است، جایی که افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن باعث شده تا مقاومت کششی دونیم 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 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 نتیجتاً 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.

### ۲-۲-۲- بررسی تاثیر شکل الیاف

با مشاهده اشکال ۷ تا ۱۰ می‌توان دید که در هر دو طرح مخلوط ۱ و ۲ استفاده از الیاف فولادی موجدار در مقایسه با الیاف صاف تاثیر قابل توجه‌تری 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 تاثیر تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار حداقل ۲۰٪ در رشد مقاومت کششی دونیم شدن موثر می‌باشد. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که نوع طرح مخلوط تاثیر 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 بررسی تاثیر تغییر شکل الیاف در طرح مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن 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 تاثیر تغییر شکل الیاف اعلام نمود.

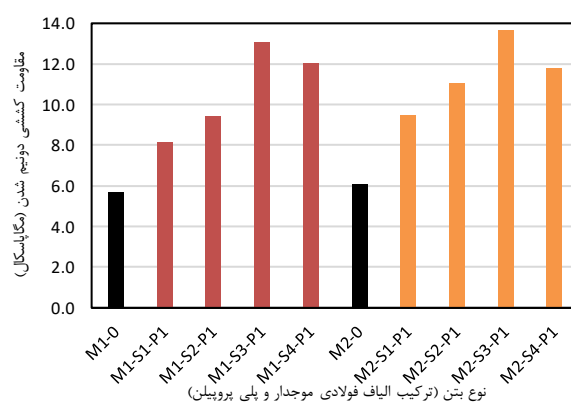
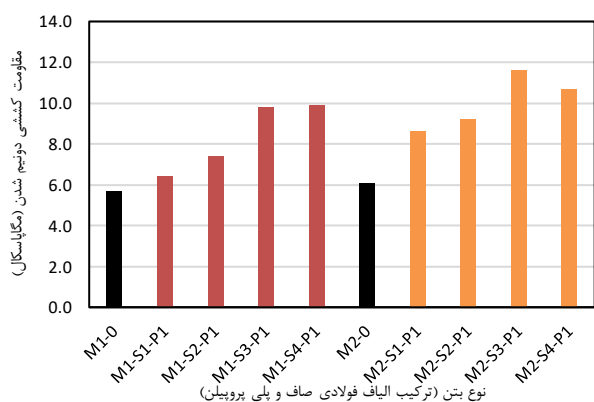


نوع بتن (فقط دارای الیاف فولادی صاف)



نوع بتن (فقط دارای الیاف فولادی موجدار)

شکل ۸ - مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ - مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲  
با الیاف فولادی موجدار



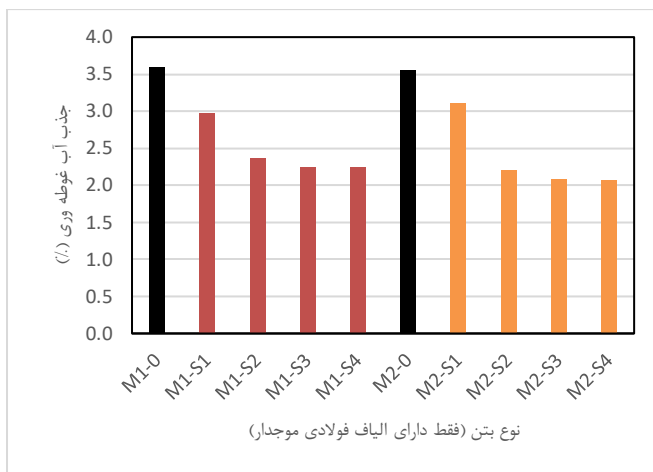
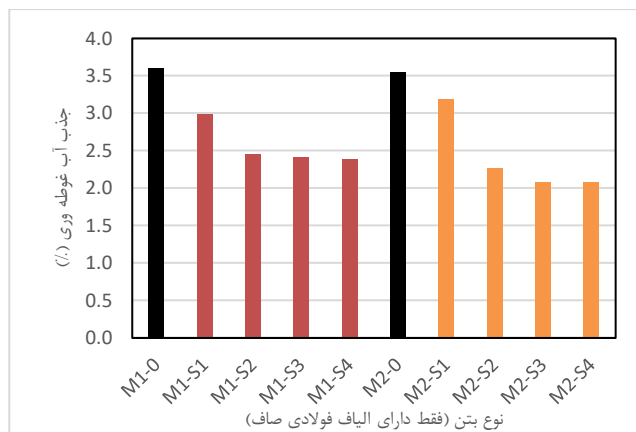
شکل ۹ - مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ - مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲  
با ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن

### ۳-۳- جذب آب غوطه‌وری

#### ۳-۳-۱- بررسی تاثیر نوع و میزان الیاف

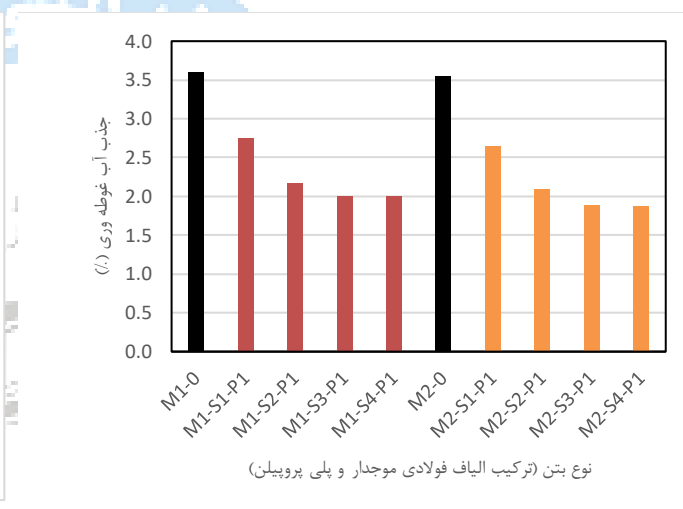
اشکال ۱۱ تا ۱۴ نشانگر نتایج جذب آب غوطه‌وری هستند. همان‌طور که دیده می‌شود، بتن‌های طرح مخلوط ۱ و ۲ بدون الیاف از جذب آب غوطه‌وری نزدیکی به هم برخوردار هستند (به ترتیب ۳/۶٪ و ۳/۵۵٪). نمودار های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که با افزایش مقدار الیاف فولادی موجدار و صاف، مقدار جذب آب غوطه‌وری کاهش یافته است. البته باید به این نکته دقت کرد که بازه تغییرات جذب آب غوطه‌وری پس از ۱٪ افزودن الیاف با افزایش مقدار الیاف به بتن با تغییرات محسوسی مواجه نشده است. بر این اساس در بتن ساخته شده با طرح مخلوط ۱، افزودن ۱٪ الیاف موجدار منجر به کاهش ۱۸٪ و افزودن بیش از ۱٪ الیاف (بین ۲٪ تا ۴٪) به طور متوسط منجر به کاهش ۳۵٪ جذب آب غوطه‌وری شده است. این نتایج برای بتن‌های ساخته شده با طرح مخلوط ۲ به ترتیب ۱۲٪ و ۴۱٪ ثبت شد. نتایج کسب شده برای بتن‌های حاوی الیاف صاف نیز به میزان زیادی مشابه نتایج کسب شده برای بتن‌های حاوی الیاف موجدار می‌باشد.

همان‌طور که دیده می‌شود با افزودن الیاف پلی پروپیلن به طرح مخلوط‌های ۱ و ۲، نیز با افزودن ۱٪ الیاف فولادی صاف یا موجدار و ترکیب آن با الیاف پلی پروپیلن افت محسوسی در جذب آب غوطه‌وری روی داده است. با این حال مشابه رفتار پیشین، پس از افزودن مقدار ۱٪ الیاف فولادی، تاثیر سایر سطوح جایگزینی در یک بازه نسبتاً ثابتی روی داده است، به نحوی که نمی‌توان به شکل معنی‌داری تفاوت محسوسی را بین جذب آب غوطه‌وری بتن‌های ساخته شده الیاف‌دار (بین بازه ۲٪ تا ۴٪) بیان کرد. با این حال در مطلوب‌ترین حالت، افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی موجدار در طرح مخلوط ۲ باعث شد تا در کنار ۱٪ فولادی موجدار، جذب آب غوطه‌وری معادل ۲۵٪ و در متوسط سایر سطوح جایگزینی الیاف فولادی موجدار (۲٪ تا ۴٪) این عدد به ۴۵٪ کاهش برسد. می‌توان دید در مقایسه با بتن‌های مشابه صرفاً با الیاف فولادی، افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث شده تا جذب آب غوطه‌وری به طور متوسط ۹٪ کاهش یابد.



شکل ۱۲ - جذب آب غوطه‌وری ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی صاف

شکل ۱۱ - جذب آب غوطه‌وری ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی موجدار



شکل ۱۴ - جذب آب غوطه‌وری ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن

شکل ۱۳ - جذب آب غوطه‌وری ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی موجدار و پلی پروپیلن

### ۲-۳-۳- بررسی تاثیر شکل الیاف

از مقایسه اشکال ۱۱ تا ۱۴ به وضوح دیده می‌شود در هر طرح مخلوط و در هر سطح جایگزینی الیاف فولادی، تغییر شکل الیاف فولادی تاثیر محسوسی در تغییرات جذب آب غوطه‌وری از خود نشان نداد. مشابه این رفتار در بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن نیز روی داد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که جذب آب غوطه‌وری بتن‌های ساخته شده مستقل از شکل الیاف فولادی می‌باشد و اگر چه با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن به هر یک از طرح‌های حاوی الیاف فولادی، از مقدار جذب آب غوطه‌وری کاسته شده است ولی مشابه بتن‌های صرفاً حاوی الیاف فولادی، در بتن‌های حاوی ترکیب الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن، جذب آب غوطه‌وری مستقل از شکل الیاف می‌باشد.

### ۴-۳- مقاومت ویژه الکتریکی حجمی تک محوره

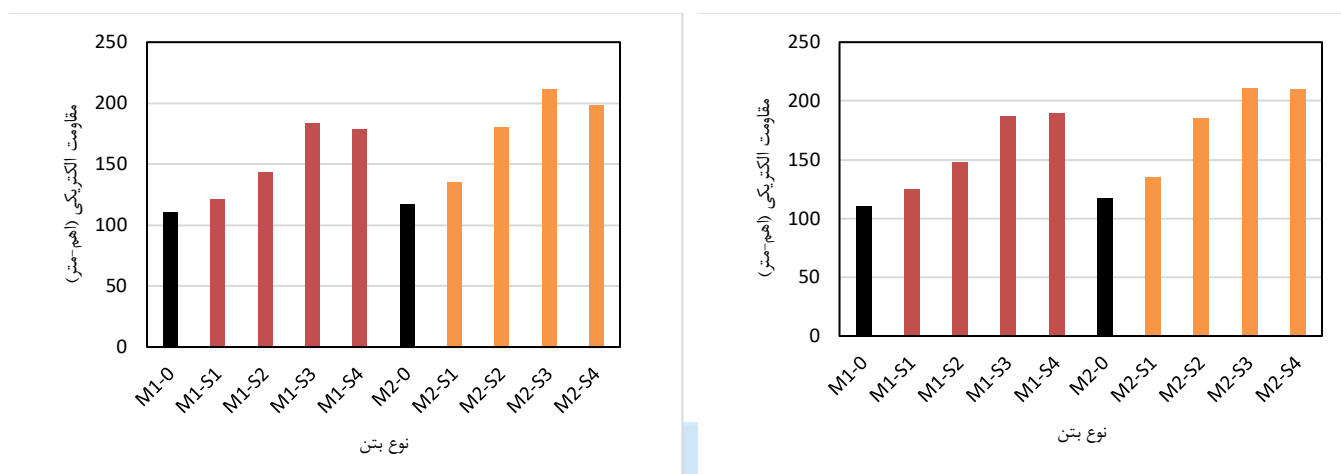
#### ۱-۴-۳- بررسی تاثیر نوع و میزان الیاف

اشکال ۱۵ تا ۱۸ نشانگر مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ساخته شده حاوی انواع الیاف فولادی و پلی پروپیلن هستند. از آنجایی که مقاومت الکتریکی بتن به ریزساختار ماتریس سیمان، خلل و فرج آن، تخلخل و اندازه حفرات وابسته است، لذا می‌توان براساس دسته‌بندی معرفی شده توسط مالهورتا و کارینو (۱۹۹۱) می‌توان رابطه معنی‌داری بین مقاومت الکتریکی و احتمال خوردگی آرماتور یافت [53]. به این ترتیب که مقاومت ویژه حجمی بیش از ۱۲۰ اهم-متر نشان‌دهنده نبود احتمال خوردگی در بتن، کمتر از ۵۰ اهم-متر احتمال قطعی خوردگی و بین این دو عدد وجود احتمال خوردگی میلگرد در بتن می‌باشد. براساس اشکال داده شده می‌توان دید که کمترین مقاومت الکتریکی کسب شده معادل ۱۱۰ و ۱۱۷ اهم-متر متعلق به بتن‌های ساخته شده با طرح مخلوط ۱ و ۲ بدون الیاف است. براساس دسته‌بندی ارائه شده این بتن‌ها در نزدیکی مرز بتن‌های با عدم وجود احتمال خوردگی هستند. با این حال، هرگونه افزودن الیاف فولادی و یا ترکیب آن‌ها با الیاف پلی پروپیلن، منتج به دستیابی به بتن‌هایی با عدم وجود احتمال خوردگی میلگرد شد. براساس نتایج می‌توان دریافت که تا مقدار جایگزینی ۳٪ الیاف فولادی (صاف یا موجدار)، ساختار بتن منسجم‌تر و متراکم‌تر شده و این امر منجر به دستیابی به بتن‌های با خلل و فرج کمتر شده است. لذا مقاومت الکتریکی بتن‌ها تا سطح جایگزینی ۳٪ رو به افزایش بوده، و پس از آن در سطح جایگزینی ۴٪ الیاف فولادی مقاومت الکتریکی افزایش معنی‌داری از خود نشان نداده و بعضاً کاهش جزئی از خود نشان داد. در بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن نیز مشابه همین رفتار مشاهده شد و کلیه بتن‌های حاوی این دو الیاف در دسته بتن‌های با عدم وجود احتمال خوردگی قرار گرفتند. با این حال می‌توان تاثیر مطلوب الیاف پلی پروپیلن را جایی مشاهده کرد که از سطح جایگزینی ۳٪ تا ۴٪ همچنان مقاومت الکتریکی افزایش یافت و از مرز ۲۲۰ اهم-متر عبور کرد. این امر نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب الیاف پلی پروپیلن با الیاف فولادی می‌تواند به شکل مطلوبی در افزایش مقاومت الکتریکی موثر واقع گردد. به طور کلی تحلیل تاثیر الیاف فولادی بر مقاومت الکتریکی بسیار پیچیده است، به نحوی که علی‌رغم وجود استدلال صحیحی که معتقد است قابلیت پل سازی توسط الیاف فولادی می‌تواند به افزایش قابلیت هدایت الکتریکی و به تبع آن کاهش مقاومت الکتریکی شود، دلایل و شواهد متعدد دیگری نیز وجود دارد که نشان می‌دهد که الیاف فولادی می‌تواند باعث افزایش مقاومت الکتریکی شود. بهبود ریزساختار بتن تحت تاثیر استفاده از سطح بهینه الیاف فولادی و نیز کاهش ریزترک‌های داخلی و ناپیوستگی‌های درون بتن باعث می‌شود تا قابلیت عبور جریان یونی درون بتن کاسته شود و این امر باعث شود تا سازوکار انتقال جریان درون بتن طولانی‌تر گردد. از سوی دیگر توزیع غیریکنواخت الیاف در بتن می‌تواند باعث شود تا مسیرهای الکتریکی طولانی‌تر شوند و عملاً الیاف‌ها به شکل موانع فیزیکی عمل نمایند. ذکر این نکته نیز قابل تامل است که در بخش جذب آب غوطه‌وری نیز دیده شد که افزودن الیاف فولادی در یک سطح بهینه منجر به کاهش نفوذپذیری بتن شد. از آنجایی که جریان الکتریکی به شدت تحت تاثیر میزان رطوبت داخلی بتن است، لذا می‌توان انتظار داشت که با کاهش میزان نفوذ آب و متعاقباً کاهش رطوبت داخلی بتن، از شدت جریان الکتریکی کاسته و بمقاومت الکتریکی افزایش یابد.

در تشریح این که افزودن الیاف پلی پروپیلن نیز منجر به بهبود مقاومت الکتریکی شده است می‌توان گفت که که افزودن الیاف بیش از حد معینی منجر به افزایش تخلخل می‌شود، و از این مقدار به بعد مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی الیاف فولادی باعث شده تا فضای حفرات موجود درون بتن توسط الیاف پر شوند و تخلخل درون بتن کم شود. از آنجایی که اندازه حفرات و وجود قابلیت ارتباط بین آن‌ها تاثیر زیادی در قابلیت انتقال یونی و مقاومت الکتریکی دارد، لذا با متراکم‌تر شدن بتن‌های حاوی الیاف فولادی در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن، از قابلیت عبور جریان یونی کاسته شده و مقاومت الکتریکی در این بتن‌ها افزایش یافته است. کاکویی و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۲) نیز نشان دادند که با افزودن الیاف پلی پروپیلن به مخلوط بتنی به دلیل کاهش تخلخل در بتن از مقاومت الکتریکی بتن کاسته می‌شود [54] در حالی که نیلی و افزوغ ثابت (۲۰۱۲) نظری متفاوت داشته و معتقدند که افزودن الیاف پلی پروپیلن منجر به افزایش تخلخل و کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود [55]. به نظر می‌رسد که با توجه به نتایج کسب شده و نیز تصاویر

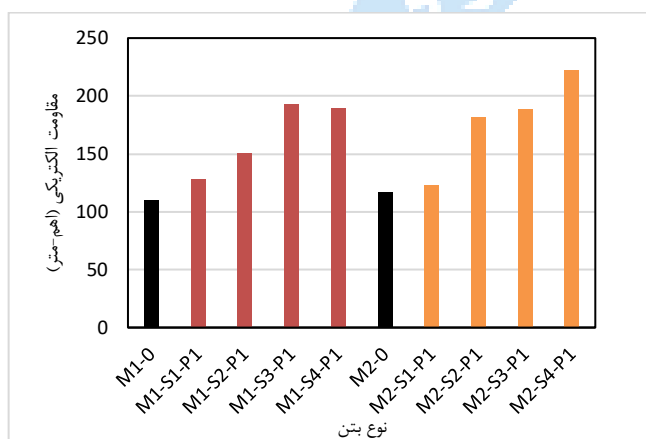
<sup>12</sup> Kakooei et al.

میکروسکوپ الکترونی مندرج در بخش ۳-۶ افزودن الیاف پلی پروپیلن در ایجاد ساختار یک دست تر و منسجم تر ماتریس سیمانی نقش مطلوبی داشته و باعث شده تا اندازه حفرات و به هم پیوستگی فضای بین آن‌ها محدودتر شود.

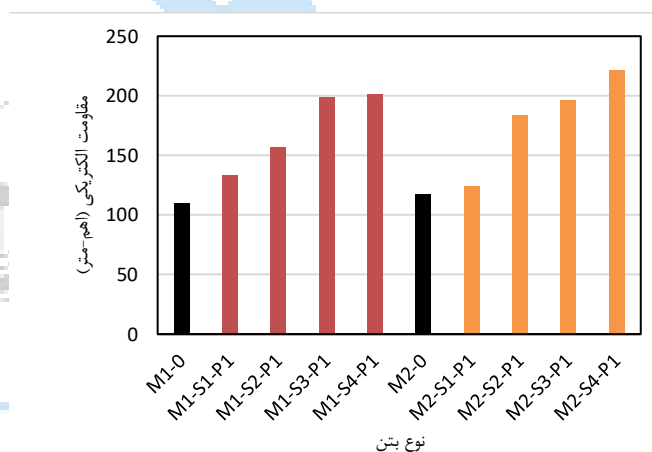


شکل ۱۶- مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی صاف

شکل ۱۵- مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با الیاف فولادی موجدار



شکل ۱۸- مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی صاف و پلی پروپیلن



شکل ۱۷- مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ با ترکیب الیاف فولادی موجدار و پلی پروپیلن

## ۲-۴-۳- بررسی تاثیر شکل الیاف

از مقایسه اشکال ۱۵ تا ۱۸ دیده می‌شود نتایج مقاومت الکتریکی حجمی بتن‌های ساخته شده با الیاف فولادی صاف به مقدار اندکی از بتن‌های ساخته شده با الیاف موجدار کمتر هستند با این حال این نتایج هرگز باعث نشدند تا مرز کیفی بتن‌های ساخته شده تغییر کند. لذا می‌توان گفت که چه در بتن‌های حاوی الیاف فولادی و چه در بتن‌های حاوی ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن تغییر شکل الیاف نمی‌تواند تاثیر معنی‌داری بر مقاومت الکتریکی بتن از خود نشان دهد.

## ۵-۳- نفوذ تسریع شده یون کلراید

### ۱-۵-۳- بررسی تاثیر نوع و میزان الیاف

نتایج مربوط به آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید براساس استاندارد ASTM C1202 در بتن‌های ساخته شده در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود شار جریان الکتریکی در بتن‌های ساخته شده با طرح مخلوط ۱ و ۲ به شکلی است که بتن‌های بدون الیاف در محدوده قابلیت نفوذ کم قرار گرفته‌اند. به همین ترتیب زمانی که بتن‌ها حاوی ۱٪ درصد فولادی (موجدار یا صاف) بودند نیز قابلیت نفوذپذیری یون کلراید در محدوده کم و یا در مرز محدوده کم و خیلی کم واقع شدند. از منظر میزان الیاف می‌توان دید که پس از افزودن ۱٪ الیاف قابلیت نفوذپذیری یون کلراید بتن‌ها وارد محدوده خیلی کم شده و در جایی میزان الیاف به ۳٪ یا ۴٪ رسید، کم‌ترین مقادیر نفوذپذیری یون کلراید ثبت شد. لذا با توجه به محدودیت‌های اقتصادی و نیز افت کارایی ناشی از افزایش بیش از حد الیاف، می‌توان از نتایج حاصله، مقدار جایگزینی ۳٪ الیاف فولادی را سطح بهینه معرفی کرد. تاثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن نیز جایی خود را نشان داد که در تمام مواردی که این الیاف به بتن‌ها افزوده شد، میزان شار جریان الکتریکی در مقایسه با بتن مشابه عاری از الیاف پلی‌پروپیلن کم‌تر ثبت شد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن باعث شد تا میزان نفوذپذیری در بتن‌های حاوی الیاف فولادی به شکل مطلوبی کاهش یابد. براساس نتایج کسب شده می‌توان به این نتیجه رسید که تا جایی که الیاف منجر به ممانعت از بروز ترک و یا گسترش ترک در بتن می‌شود، احتمال نفوذپذیری یون کلراید در بتن کم خواهد بود. در همین راستا، عباس و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۵) در ساخت بتن‌های فوق توانمند نشان دادند افزودن الیاف فولادی منجر به کاهش میزان شار جریان الکتریکی کمتر از ۱۰۰ کولمب می‌شود [56]. وایشالی و رائو<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۲) کاهش شار جریان الکتریکی در اثر افزایش حجم الیاف فولادی را در اثر افزایش مقاومت ماتریس سیمانی در برابر تشکیل ترک‌های پلاستیک معرفی کردند [57]. بهفرنیا و بهروان (۲۰۱۴) نیز مشابه این نتایج را اعلام کرده و معتقدند که با افزایش الیاف فولادی مجرای حفرات و ارتباط میان آن‌ها مسدود شده و متعاقباً نفوذپذیری بتن کاسته می‌شود [58]. رضانیان پور و همکاران (۲۰۱۳) نیز کاهش رسانایی منافذ داخلی و کاهش حفرات موئینه را عامل اصلی کاهش نفوذپذیری یون کلراید در اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ماتریس سیمانی دانسته است [59]. از نتایج کسب شده می‌توان دید که مطلوبیت ترکیب دو الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن منجر به کسب شار کمتر جریان الکتریکی در بتن‌های ساخته شده گردید. در واقع از آنجایی که اندازه ریز ترک‌های داخلی نقش اصلی در تعیین میزان نفوذپذیری بتن را ایفا می‌کند می‌توان گفت که انعطاف‌پذیری و قابلیت دوختن دهانه‌های باز شده ترک‌ها توسط الیاف پلی‌پروپیلن، باعث شده تا توسعه ترک در طول و عرض با تعویق زمانی بیشتری حادث شود و این امر باعث شده تا امکان نفوذ یون‌های خورنده به درون بتن با تاخیر زمانی بیشتری صورت پذیرد. بلانت و همکاران<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۵) نیز در تایید این نتایج، تاخیر وقوع ترک در بتن‌های حاوی الیاف ترکیبی را عامل شار کمتر جریان الکتریکی معرفی کردند [60].

## ۲-۵-۳- بررسی تاثیر شکل الیاف

از آنجایی که نتایج آزمون ASTM C1202 به صورت کیفی هستند، لذا با توجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۰ می‌توان دید که با تغییر شکل الیاف از موجدار به صاف، تغییر محسوس و معنی‌داری در میزان نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده ایجاد نمی‌شود. وقوع این پدیده در سایر نتایج نیز مشهود است به طوری که عباس و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که علاوه بر شکل الیاف فولادی، طول الیاف فولادی هم تاثیر محسوسی بر نفوذپذیری بتن الیافی نداشته و در مقابل این حجم الیاف است که می‌تواند مقدار شار جریان الکتریکی را تحت تاثیر قرار دهد [56]. در تنها حالتی که تغییری در دسته‌بندی کیفی روی داد، حالتی است که در طرح مخلوط شماره ۱ و ۲ حاوی ۱٪ الیاف فولادی و ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن، شکل الیاف از موجدار به صاف تغییر یافته است که در این حالت علی‌رغم تغییرات جزئی در میزان شار (کم‌تر از ۹۰ واحد) مرز کیفی از حالت نفوذپذیری خیلی کم به مرز کیفی کم تغییری یافته است. با این حال به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت که

<sup>13</sup> Abbas et al.

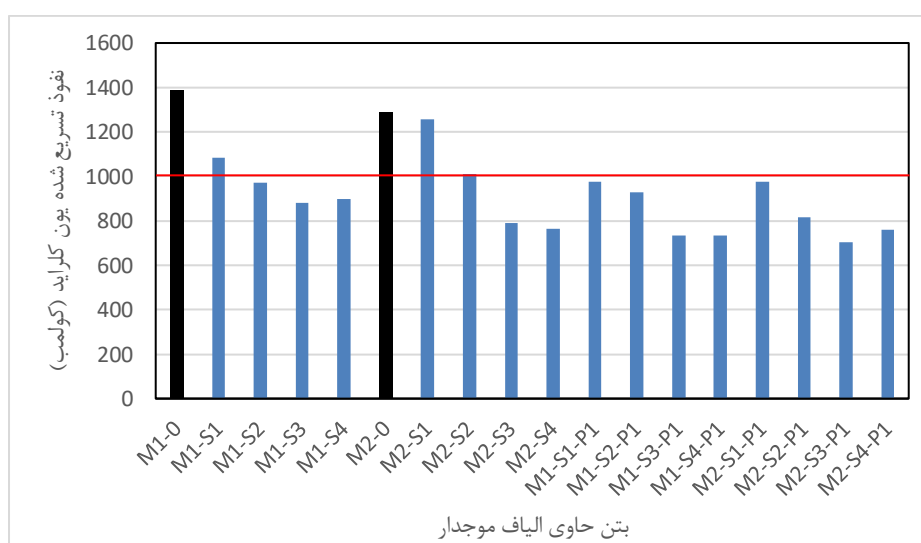
<sup>14</sup> Vaishali and Rao

<sup>15</sup> Blunt et al.

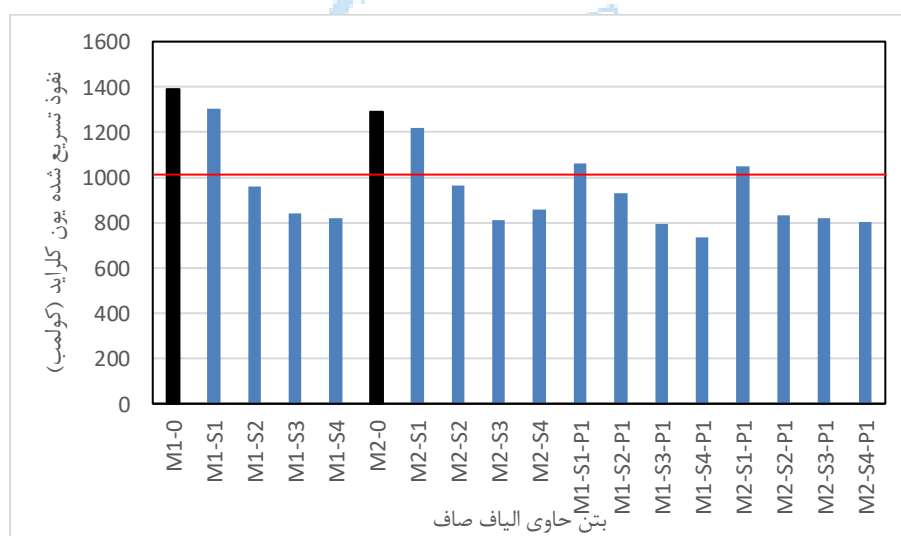


تغییر شکل الیاف از حالت موجدار به صاف تاثیر به خصوصی در تغییر کیفیت بتن در تعیین میزان نفوذپذیری یون کلراید از خود نشان نمی‌دهد.

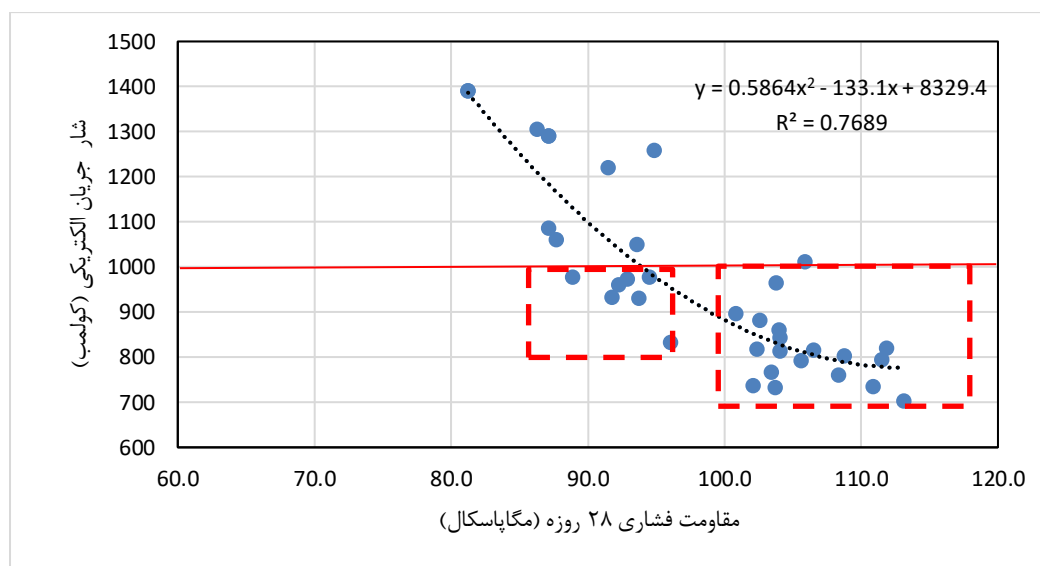
همان‌طور که شکل ۲۱ نشان می‌دهد می‌توان رابطه نسبتاً مطلوبی بین مقاومت فشاری و میزان شار جریان الکتریکی بتن‌های ساخته شده دید. از دسته‌بندی انجام داده شده در نمودار نیز می‌توان دید که به‌طور کلی هرچه که مقاومت فشاری افزایش یافته، میزان نفوذپذیری یون کلراید در بتن‌ها نیز کم‌تر شده است. در مجموع می‌توان گفت، گرچه در مقاومت‌های کم‌تر از ۱۰۰ مگاپاسکال نیز بتن‌های هستند که در محدوده سطحی کیفی با نفوذپذیری خیلی کم می‌باشند، با این حال در بتن‌های با مقاومت فشاری بیشتر از ۱۰۰ مگاپاسکال، میزان نفوذپذیری یون کلراید به شکلی است که این مرز مقاومتی را می‌توان مرز دستیابی قطعی به بتن‌های با نفوذپذیری خیلی کم یون کلراید معرفی کرد.



شکل ۱۹- نفوذ تسریع شده یون کلراید در سن ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ حاوی الیاف موجدار



شکل ۲۰- نفوذ تسریع شده یون کلراید در سن ۱۸۰ روزه مخلوط‌های ۱ و ۲ حاوی الیاف صاف



شکل ۲۱- رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری یون کلراید ۱۸۰ روزه

### ۳-۶- بررسی ریزساختار

در شکل ۲۲-الف، تاثیر مثبت توزیع غیر یکنواخت الیاف پلی پروپیلن در فواصل حداکثر ۲ میلی متری از نمونه مشاهده می شود. این الیاف، برخلاف الیاف فولادی که به دلیل محدودیت اندازه و انعطاف پذیری کم قادر به ایجاد پیوستگی کامل در ماتریس سیمانی نیستند، می توانند بتن را در زوایای مختلف مسلح کنند. این ویژگی بهبود ریزساختار را نشان داده و علت ارتقای خواص مکانیکی و دوام بتن هایی که ترکیبی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن دارند، توضیح می دهد. در شکل ۲۲-ب می توان علت افزایش مقاومت کششی دونیم شدن بتن هایی که به آنها الیاف پلی پروپیلن افزوده شده را دید. ساختار خشن و بافت زبر الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با بافت نرم و صاف الیاف فولادی (شکل ۲۲-ج) باعث می شود تا در کنار تاثیر مقاومت کششی بالای الیاف فولادی بر ویژگی های کششی، پیوستگی زیاد ناشی از اندرکنش بین بافت زبر الیاف پلی پروپیلن و ماتریس سیمانی نیز به شکل هم افزا بر افزایش این ویژگی ها موثر باشد. در این شکل می توان دید که به علت بافت خشن تر الیاف پلی پروپیلن، هنوز هم اثرات به جای ماندن ماتریس سیمانی به علت پیوستگی آن با ملات سیمانی وجود دارد. در مقابل سطح صاف و صیقلی شده الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن عاری از آن شدت از پیوستگی های پوستی میان پوسته الیاف و ماتریس سیمانی است. با این حال به دلیل منسجم بودن ساختار ماتریس سیمانی و قوام بالای آن ناحیه انتقال ایجاد شده بین الیاف فولادی و ماتریس سیمانی کمتر از ۱۰ میکرومتر ثبت شد. بدیهی است وجود نواحی انتقال با این ضخامت تاثیر به سزایی در افزایش ویژگی های مکانیکی و دوام بتن خواهند داشت. در شکل ۲۲-د نیز می توان قابلیت در هم تنیدگی بسیار زیاد الیاف پلی پروپیلن در یک بخش جدا شده از بتن را دید. می توان دید یک توده کوچک از الیاف های در هم تنیده شده چگونه می توانند که یک بخش کوچک از ماتریس سیمانی را در جهات مختلفی مسلح کنند. البته لازم است با توجه به خط اندازه به کوچک بودن این مقدار از بخش توده شده الیاف پلی پروپیلن در بتن نیز توجه داشت، چرا که بدیهی است در صورتی که توده های الیاف در ابعاد و اندازه های بزرگ در قسمتی از بتن مستقر شوند به دلیل توزیع ناهمگون، می توانند منجر به کاهش خواص مکانیکی نیز گردند. تصاویر ۲۲-ه و ۲۲-و نیز اندازه عرض ناحیه انتقال میان سنگدانه های سیلیسی و ماتریس سیمانی را نشان می دهند. در شکل ۲۲-ه گرچه ناحیه انتقال حدود ۲۰ میکرومتر تخمین زده شده، ولی می توان دید که در همین مرز نیز محصولاتی ناشی از واکنش هیدراسیون در پر کردن این مرز و کاهش ضخامت این ناحیه دخیل بوده اند. همان طور که دیده می شود ضخامت ناحیه انتقال بین ماتریس سیمانی و سنگدانه سیلیسی بین ۵ تا ۲۰ متغیر می باشد که از این منظر به دلیل کم بودن

این ضخامت می‌توان تاثیر مثبت ناحیه انتقال شکل گرفته شده در ارتقای خواص مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته را به واسطه طرح اختلاط‌های پیشنهادی دریافت.

<p>الف) توزیع الیاف‌های پلی‌پروپیلن در سطح ملات (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)</p>	<p>ب) بافت خشن و زیر سطحی الیاف پلی‌پروپیلن (بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر)</p>
<p>ج) سطح صاف ناحیه انتقال به ضخامت کمتر از ۱۰ میکرومتر بین الیاف فولادی و ملات سیمانی (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)</p>	<p>د) قابلیت در هم تنیدگی الیاف پلی‌پروپیلن در زوایای مختلف (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)</p>
<p>ه) مرز ناحیه انتقال متراکم بین سنگدانه سیلیسی و ملات به</p>	<p>و) ایجاد ناحیه انتقال متراکم بین سنگدانه سیلیسی و ملات سیمانی</p>

به ضخامت کمتر از ۵ میکرومتر (بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر)	ضخامت کمتر از ۲۰ میکرومتر (بزرگنمایی ۵۰۰ برابر)
شکل ۲۲- حالات مختلف از بافت و ریزساختار ناحیه انتقال تشکیل شده اطراف سنگدانه‌ها و الیاف‌های مصرفی	

#### ۴- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش خواص مکانیکی و دوام 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 سطح جایگزینی ۳٪ از الیاف فولادی، تاثیر نامناسب کاهش حجم ماتریس سیمانی ناشی از افزودن الیاف فولادی، بیشتر از تاثیر 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 ۸٪ (۷-۸) رشد نماید.
  - ۳- تاثیر 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 دونیم‌شدن در طرح مخلوط ۱ به ترتیب ۴۴٪ و ۸۱٪ رشد کند. این افزایش در طرح مخلوط ۲، معادل ۴۹٪ و ۸۰٪ ثبت شد.
  - ۵- بیشترین مقاومت کششی دونیم‌شدن در بتن حاوی ۱٪ الیاف پلی پروپیلن و ۳٪ الیاف فولادی موجدار، معادل ۱۳/۷ مگاپاسکال حاصل شد. در این حالت الیاف پلی پروپیلن حدود ۲۵٪ منجر به بهبود مقاومت کششی نسبت به حالت بدون الیاف پلی پروپیلن شد.
  - ۶- تغییر شکل الیاف از صاف به موجدار منجر به رشد مقاومت کششی دونیم‌شدن بین ۲۲٪-۲۰٪ شد. این افزایش مستقل از نوع طرح مخلوط بود.
  - ۷- با افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی، جذب آب غوطه‌وری ۲۵٪ کاهش یافت. افزودن این مقدار الیاف به بتن‌های حاوی ۲٪ تا ۴٪ الیاف فولادی به طور متوسط منجر به ۴۵٪ کاهش جذب آب غوطه‌وری شد.
  - ۸- حتی کمترین مقدار افزودن الیاف فولادی به بتن‌های ساخته شده باعث شد تا وجود احتمال خوردگی فولاد در در بتن‌ها از بین برود. به دلیل کاهش حفرات و از بین رفتن قابلیت فضای ارتباطی بین حفرات، افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های الیاف‌دار فولادی، این احتمال را به میزان زیادی کاهش داد.
  - ۹- شکل الیاف تاثیر محسوسی در خواص دوامی (جذب آب، مقاومت الکتریکی و نفوذ تسریع شده یون کلراید) نداشت. از منظر آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید، بتن‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی عموماً در دسته با احتمال نفوذپذیری کم قرار گرفتند. با این حال هرچه مقدار الیاف فولادی افزایش یافت، از میزان نفوذپذیری بتن‌ها کاسته شد (همگی در دسته احتمال کم قرار گرفتند) به نحوی که مطلوب‌ترین حالت در سطح جایگزینی ۳٪ الیاف فولادی کسب شد.

#### مراجع

- [1] Mangi, S.A., Memon, Z.A., Khahro, S.H., Memon, R.A. and Memon, A.H. (2020). Potentiality of industrial waste as supplementary cementitious material in concrete production. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 11(5), 214-221.
- [2] Marcalikova, Z., Sucharda, O. (2021). Modeling of Fiber-Reinforced Concrete and Finite Element Method, *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 12 (1), 11-19.
- [3] Fayadh, O.K., Qasim, O.A., and Farhan, O.S. Effects of Concrete Types, Elevated Temperatures, and Different Cooling Technique on Concrete Compressive Strength. *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(3), 1916-1931.
- [4] Wu, Z., Shi, C. and Khayat, K.H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, 71, 97-109.
- [5] Jassam, S.H., Qasim, O.A. and Maula, B.H. Effect of Fiber Type on High Strength Concrete Mechanical Properties. *International Review of Civil Engineering*, 13(2), 146-155.
- [6] Suhaendi S. L., and Horiguchi T. (2006). Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete after heat exposition, *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1672-1678.
- [7] Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ. and Şahin, Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and building materials*, 22(8), 1874-1880.
- [8] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82.
- [9] Fallah, S. and Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macropolymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and building materials*, 132, 170-187.
- [10] Yoo, D.Y., Shin, H.O., Yang, J.M. and Yoon, Y.S. (2014). Material and bond properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites Part B: Engineering*, 58, 122-133.
- [11] Choe, G., Kim, G., Kim, H., Hwang, E., Lee, S. and Nam, J. (2019). Effect of amorphous metallic fiber on mechanical properties of high-strength concrete exposed to high-temperature. *Construction and Building Materials*, 218, 448-456.
- [12] Qasim, O.A. (2019). Specimen size and shape effects on the concrete properties, thermal conductivity and heat generation from hydration for different concrete types. *Journal of Computational and Theoretical Nano-science*, 16(10), 4072-4091.
- [13] Mazloom, M., Ramezani-pour, A.A. and Brooks, J.J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and concrete composites*, 26(4), 347-357.
- [14] Song, P.S. and Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- [15] Noumowe, A. (2005). Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibers exposed to temperatures up to 200 C. *Cement and concrete research*, 35(11), 2192-2198.
- [16] Hasan-Nattaj, F. and Nematzadeh, M. (2017). The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica. *Construction and Building Materials*, 137, 557-572.
- [17] Lee, S.F. and Jacobsen, S. (2011). Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and structures*, 44, 1451-1465.
- [18] Li, V.C., Wu, H.C. and Chan, Y.W. (1996). Effect of plasma treatment of polyethylene fibers on interface and cementitious composite properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(3), 700-704.
- [19] Wang, X.H., Jacobsen, S., He, J.Y., Zhang, Z.L., Lee, S.F. and Lein, H.L. (2009). Application of Nano-indentation testing to study of the interfacial transition zone in steel fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 701-715.
- [20] Wille, K. and Naaman, A.E. (2012). Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(4).
- [21] Wu, Z., Shi, C., He, W. and Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Construction and building materials*, 103, 8-14.
- [22] Blunt, J., Jen, G., Ostertag, C.P. (2015). Enhancing corrosion resistance of reinforced concrete structures with hybrid fiber reinforced concrete. *Corros. Sci.* 92, 182-191.
- [23] Wang, X.H., Jacobsen, S., Lee, S.F., He, J.Y. and Zhang, Z.L. (2010). Effect of silica fume, steel fiber and ITZ on the strength and fracture behavior of mortar. *Materials and structures*, 43, 125-139.
- [24] ASTM C109/C109M-07. (2007). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken.
- [۲۰] ASTM C496 / C496M-17. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken.

- [26] ASTM C1609/C1609M-19. (2019). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM C642-21. (2021). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM C1202-19. (2019). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride, West Conshohocken, PA.
- [29] Le Hoang, A., & Fehling, E. (2017). Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 790-806.
- [30] Park, J. J., Yoo, D. Y., Park, G. J., & Kim, S. W. (2017). Feasibility of reducing the fiber content in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under flexure. *Materials*, 10(2), 118.
- [31] Pourbaba, M., Asefi, E., Sadaghian, H., & Mirmiran, A. (2018). Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 402-410.
- [32] Wang, R., & Gao, X. (2016). Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber. *Applied Sciences*, 6(8), 216.
- [33] Yang, J., Chen, B., & Nuti, C. (2021). Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 302, 124104.
- [34] Esmacili, J., & AL-Mwanes, A. O. (2021). A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1958-1965.
- [35] Yu, J., Zhang, B., Chen, W., & He, J. (2020). 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*, 260, 120444.
- [36] Yoo, D. Y., Lee, J. H., & Yoon, Y. S. (2013). Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite structures*, 106, 742-753.
- [37] Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wang, D. (2017). Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. *Cement and Concrete Composites*, 79, 148-157.
- [38] Alsaman, A., Dang, C. N., Prinz, G. S., & Hale, W. M. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 918-928.
- [39] Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., & Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91-97.
- [40] Rashiddadash, P., Ramezani-pour, A. A., & Mahdikhani, M. (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Construction and Building Materials*, 51, 313-320.
- [41] Libre, N. A., Shekarchi, M., Mahoutian, M., & Soroushian, P. (2011). Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2458-2464.
- [42] Meng, W., & Khayat, K. H. (2018). Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 04018030.
- [43] Le Hoang, A., & Fehling, E. (2017). Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 790-806.
- [44] Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- [45] Yang, J., Chen, B., Su, J., Xu, G., Zhang, D., & Zhou, J. (2022). Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(3), 363-387.
- [46] Hu, A., Liang, X., Yu, J., & Shi, Q. (2018). Tensile characteristics of ultra-high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, 70(6), 314-324.
- [47] Li, Y., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2018). 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*, 169, 629-637.
- [48] Yoo, D. Y., Kim, S., Park, G. J., Park, J. J., & Kim, S. W. (2017). Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*, 174, 375-388.
- [49] Abbas, S., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2015). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*, 75, 429-441.
- [50] Choi, W. C., Jung, K. Y., Jang, S. J., & Yun, H. D. (2019). The influence of steel fiber tensile strengths and aspect ratios on the fracture properties of high-strength concrete. *Materials*, 12(13), 2105.
- [51] Teng, S., Afroughsabet, V., & Ostertag, C. P. (2018). Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 504-515.

- [52] Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8-14.
- [53] Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC press.
- [54] Kakooei, S., Akil, H.M., Jamshidi, M., Rouhi, J. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, 27(1), 73-77.
- [55] Nili, M., Afroughsabet, V. (2012). The long-term compressive strength and durability properties of silica fume fiber-reinforced concrete, *Materials Science and Engineering*, 531,107-111.
- [56] Abbas, S., Soliman, A.M., Nehdi, M.L. (2015). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages, *Construction and Building Materials*, 75, 429-441.
- [57] Vaishali, G.G., Rao, H.S. (2012). Strength and permeability characteristics of fiber reinforced high performance concrete with recycled aggregates. *Asian Journal of Civil Engineering*, 13(1), 55-77.
- [58] Behfarnia, K. Behravan, A. (2014). Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels. *Materials and Design*, 55, 274-279.
- [59] Ramezani pour, A.A., Esmaili, M., Ghahari, S.A., Najafi, M.H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411-418.
- [60] Blunt, J., Jen, G., Ostertag, C.P. (2015). Enhancing corrosion resistance of reinforced concrete structures with hybrid fiber reinforced concrete. *Corrosion Science*, 92,182-191.

