

بررسی اثر کاربرد الیاف پلی پروپیلن بر روی مقاومت دو نیم‌شدگی، ظرفیت کرنشی و جذب انرژی بتن‌های غلطکی نیمه‌سبک با هدف استفاده در بلوک‌های بتنی

محمد یکرنگ‌نیا* (استادیار)

مصطفی آدرسی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

هدف از این مطالعه بهبود عملکرد کششی مصالح تشکیل‌دهنده این بلوک‌ها با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن است. در این راستا تعداد ۸۴ نمونه استوانه‌یی و مکعبی تحت آزمایش‌های دو نیم‌شدگی و فشاری قرار گرفتند. سه پارامتر نوع الیاف، مقدار الیاف و نیز مقدار خمیر سیمان به عنوان متغیر در نظر گرفته شد تا تأثیر هر یک بر روی مشخصات مکانیکی مصالح شامل مقاومت دو نیم‌شدگی، ظرفیت کرنشی و جذب انرژی در کشش و نیز مقاومت فشاری مصالح بررسی شود. نتایج این مطالعه حاکی از این است که نمونه‌های فاقد الیاف به صورت ترد و ناگهانی دچار گسیختگی می‌شوند؛ اما حالت خرابی در نمونه‌های دارای الیاف از شکل‌پذیری مناسبی برخوردار است. همچنین با اضافه کردن الیاف بهبود قابل ملاحظه‌یی در همه مشخصات مکانیکی مورد بررسی مصالح مشاهده شد. به‌طور کلی، میزان بهبود در نمونه‌های دارای الیاف کوچک‌مقیاس بهتر از نمونه‌های متناظر با الیاف بزرگ‌مقیاس بود و نیز این بهبود با افزایش مقدار خمیر سیمان بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: الیاف پلی پروپیلن، مقاومت دو نیم‌شدگی، درصد الیاف، میزان سیمان، بتن‌های غلطکی

۱. مقدمه

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان محسوب می‌شود و ضرورت توسعه آن نیز روز به روز افزایش می‌یابد. با پیشرفت علم و پیدایش سیستم‌های پیچیده‌تر ساختمانی و همچنین روند رو به گسترش ساخت‌وساز در سطح گسترده، به‌کارگیری مصالح ساختمانی جدیدتر با کارایی بیشتر، نیاز است.^[۱] یکی از پرکاربردترین مصالح مصرفی در صنعت ساختمان بلوک‌ها هستند که در قالب میان قاب‌های مصالح بنایی و نیز دیوارهای بلوکی استفاده می‌شوند. از میان انواع بلوک‌های موجود با مصالح مختلف، بلوک‌های بتنی به دلیل عدم نیاز به پخت و نیز مقاومت قابل توجه کاربرد روزافزونی یافته‌اند. با این حال مشاهدات صورت گرفته از نتایج آزمایشگاهی و نیز زلزله‌های گذشته نشان‌دهنده آسیب‌پذیری این بلوک‌ها تحت بارهای وارده هستند که در قالب مودهای خرابی دو نیم‌شدگی و ترک‌های ناشی از تنش‌های فشاری در این بلوک‌ها بروز می‌کند. استفاده از الیاف با هدف بهبود رفتار کششی بتن سابق‌های نسبتاً طولانی در حوزه مصالح در صنعت ساختمان داشته است و

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

DOI:10.24200/J30.2021.56548.2836

۲. مروری بر تاریخچه تحقیق

هاشمی و حسنی^[۱]، با انجام آزمایش‌های فشاری، کششی و چسبندگی بر روی بتن‌های خودتراکم، به بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلن در چسبندگی میان بتن و میلگردها پرداختند. مقدار الیاف مورد استفاده صفر، ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ کیلوگرم در مترمکعب بتن بود. نتایج نشان داد وجود الیاف سبب کاهش کارایی بتن شد اما منجر به بهبود خاصیت کششی و چسبندگی میان بتن و میلگرد شد. نتایج مطالعات خالد و همکاران^[۲]، ابریشم‌باف و همکاران^[۳]، مجابین و همکاران^[۴] نیز مؤید این امر است. در تعیین مقدار بهینه‌ی الیاف طول الیاف، میزان خمیر سیمان، نسبت الیاف به خمیر و چگونگی پخش و همچنین نسبت آب به سیمان دارای اهمیت

جدول ۱. مشخصات طرح‌های اختلاط (شامل آزمایش‌های دو نیم‌شدگی و فشاری از هر آزمایش ۳ نمونه).

مقدار سیمان	الیاف		نام طرح اختلاط
	درصد	نوع	
۲۶۰	-	-	SCC-۲۶۰
۳۲۰	-	-	SCC-۳۲۰
۲۶۰	۰/۵	بزرگ مقیاس	SCC-MA-۰/۵-۲۶۰
۲۶۰	۱/۵	بزرگ مقیاس	SCC-MA-۱/۵-۲۶۰
۲۶۰	۲/۰	بزرگ مقیاس	SCC-MA-۲/۰-۲۶۰
۳۲۰	۰/۵	بزرگ مقیاس	SCC-MA-۰/۵-۳۲۰
۳۲۰	۱/۵	بزرگ مقیاس	SCC-MA-۱/۵-۳۲۰
۳۲۰	۲/۰	بزرگ مقیاس	SCC-MA-۲/۰-۳۲۰
۲۶۰	۰/۵	کوچک مقیاس	SCC-MI-۰/۵-۲۶۰
۲۶۰	۱/۵	کوچک مقیاس	SCC-MI-۱/۵-۲۶۰
۲۶۰	۲/۰	کوچک مقیاس	SCC-MI-۲/۰-۲۶۰
۳۲۰	۰/۵	کوچک مقیاس	SCC-MI-۰/۵-۳۲۰
۳۲۰	۱/۵	کوچک مقیاس	SCC-MI-۱/۵-۳۲۰
۳۲۰	۲/۰	کوچک مقیاس	SCC-MI-۲/۰-۳۲۰

متغیرهای مورد بررسی در نظر گرفته شدند. هریک از این پارامترها تأثیری خاص بر روی عملکرد بتن غلطکی حاصل دارد. ۲ نوع الیاف پلی پروپیلن ماکرو و میکرو مورد استفاده قرار گرفتند. الیاف میکرو به منظور مقابله با باز شدن ریزترک‌ها و ترک‌های مویی در نظر گرفته شدند، در حالیکه الیاف ماکرو به منظور مقابله با ترک‌های متمرکزتر و با عرض بیشتر می‌توانند مفیدتر باشند. بدیهی است حالت ایده‌آل مقابله با ترک‌های محتمل در اعضای بتنی، استفاده از ترکیبی از الیاف ماکرو و میکرو به منظور ایجاد قابلیت مهار ترک‌های مختلف ریز و درشت است. با این حال در این مطالعه، هریک از الیاف مذکور به تنهایی در نمونه‌های مورد بررسی استفاده شدند تا تأثیر هر متغیر به تنهایی بررسی شود. سه درصد مختلف الیاف ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۰ درصد حجمی سیمان در نظر گرفته شد تا میزان بهبود پارامترهای عملکرد کششی و نیز فشاری مصالح بر اساس درصد الیاف مورد استفاده مطالعه شود. به منظور بررسی تأثیر مقدار خمیر سیمان که علاوه بر داشتن نقش اصلی در تأمین مقاومت کششی و تا حدی فشاری، بستری را برای پخش یکنواخت الیاف اضافه شده فراهم میکند، دو مقدار خمیر سیمان ۲۶۰ و ۳۲۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی رفتار کششی و فشاری، به ترتیب از نمونه‌های استاندارد استوانه‌یی با ابعاد ۱۵ × ۱۵ × ۳۰ سانتی‌متر و مکعبی با ابعاد ۱۵ × ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متر بر اساس استانداردهای به ترتیب ASTM C۳۹/C۳۹M - ۰۴a^[۲۱] و BS EN ۱۲۳۹۰ - ۲ : ۲۰۰۹^[۲۲] استفاده شد. از هر طرح اختلاط، ۳ نمونه‌ی استوانه‌یی و ۳ نمونه‌ی مکعبی ساخته شد که در نهایت با توجه به متغیرهای مورد بررسی، تعداد ۸۴ نمونه ساخته شد. مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۳. مشخصات مصالح

از آنجا که هدف از این مطالعه، بهبود رفتار کششی مصالح بتن غلطکی نیمه سبک مورد استفاده در بلوک‌های بتنی است، از مصالح درشت دانه برای طرح اختلاط استفاده نشد و از پوک‌های معدنی ریزدانه به عنوان مصالح جایگزین در طرح اختلاط

است که در میزان پخش الیاف و در نهایت خواص مکانیکی بتن تأثیرگذار است. سونیل و کومار^[۶] با به کار بردن الیاف پلی پروپیلن، شیشه، نارگیل، نایلون و فولادی در بلوک‌های بتنی به بررسی تأثیر اضافه کردن این الیاف بر روی مقاومت فشاری این بلوک‌ها پرداختند. از اهداف کار ایشان، تعیین مقدار بهینه‌ی مصرف الیاف با شرط حصول بیشینه‌ی مقاومت فشاری بود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد مقدار ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن مقدار بهینه در این مطالعه بود. مطالعات مشابهی با نتایج یکسان توسط باقری و همکاران^[۷]، شی و همکاران^[۸]، ونگ و همکاران^[۹]، گوا و همکاران^[۱۰] و لی و همکاران^[۱۱] انجام شده است. در مطالعه‌ی که توسط سوبایر و پاول انجام شد^[۱۲]، تأثیر اضافه کردن الیاف فولادی و نیز جایگزینی ماسه با خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری فوم بتن بررسی شد. ایشان نتیجه‌گیری کردند تأثیر الیاف فولادی بر افزایش مقاومت فشاری فوم بتن در حدود ۴٪ است که نشان از تأثیر قابل اغماض الیاف بر ظرفیت فشاری بتن دارد. نتایج نسبتاً مشابهی توسط تقفی و همکاران^[۱۳]، کین و همکاران^[۱۴]، بهنود و همکاران^[۱۵]، الوصابی و همکاران^[۱۶] و کریمی و همکاران^[۱۷] حاصل شده است.

گلستان و حاجیانی بوشهریان^[۱۸] با بررسی ۴ طرح اختلاط بر مبنای مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال و نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ به بررسی رفتار بتن‌های الیاف فلزی در برابر نفوذپذیری آب در بتن و نیز مقاومت فشاری آن پرداختند. هر طرح اختلاط شامل الیاف فلزی با درصدهای حجمی صفر تا ۱/۲ از حجم بتن بود. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بودند که کاربرد الیاف فلزی در درصدهای پایین تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها ندارد، اما در درصدهای بالا الیاف فلزی مقاومت فشاری نمونه‌ها را افزایش می‌دهند. وو و همکاران^[۱۹] با بررسی رفتار تنش - کرنش بتن‌های با الیاف پلی پروپیلن، به ارائه‌ی روابط طراحی تیرها و اسلب‌های ساخته شده از این نوع بتن تحت اثر بارهای خمشی پرداختند. صابری و نادری^[۲۰] با ارائه‌ی روش‌های آزمایش میدانی نیمه‌مخرب، سعی در تعیین مشخصات فشاری و خمشی ملات‌های مسلح با الیاف پلی پروپیلن از طریق شبیه‌سازی‌های عددی پرداختند. مطالعات ایشان حاکی از نزدیکی نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی بود.

با این حال تاکنون مطالعه‌ی مستندی بر روی تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی بتن‌های نیمه‌سبک غلطکی با تأکید بر بهبود در پارامترهای مکانیکی مصالح شامل مقاومت دو نیم‌شدگی، ظرفیت کرنشی و جذب انرژی انجام نشده است. هدف از این مطالعه رسیدن به رفتار کششی بهبود یافته‌ی بلوک‌های بتنی سبک به عنوان رفتار غالب آنها در اجزای سازه‌ی است. همانطور که اشاره شد، یکی از مشکلات اصلی در بلوک‌های سیمانی و بتنی تردشکنی آنها در هنگام وارد آمدن بارهای لرزه‌یی است که سبب بروز ضعف‌های جدی در عملکرد لرزه‌یی سازه‌های مصالح بنایی و نیز سازه‌های قابی با میان قاب‌های بلوکی سازه‌ی می‌شود. در این مطالعه با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن با جزئیات مختلف به مخلوط بتن بلوک‌های بتنی غلطکی، سعی در کاهش این ضعف بنیادی در مصالح شده است که از این منظر دارای نوآوری است. در ابتدا برنامه‌ی آزمایش شامل متغیرهای مورد بررسی و مشخصات مصالح شرح داده می‌شود. در ادامه روند ساخت نمونه‌ها و عمل‌آوری و نیز انجام آزمایش‌ها ارائه می‌شود و در نهایت، نتایج بررسی و تفسیر قرار می‌شوند.

۳. مصالح و روش انجام آزمایش‌ها

۳.۱. متغیرهای مورد بررسی

در این مطالعه، سه پارامتر نوع الیاف، درصد الیاف و مقدار خمیر سیمان به عنوان

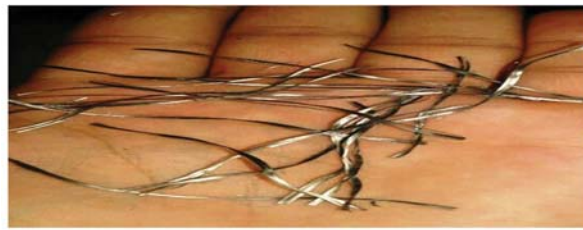


الف) الیاف ماکرو پخش شده؛



ب) نمونه های ساخته شده از الیاف میکرو.

شکل ۳. نمونه هایی از پخش الیاف و ساخت نمونه ها.

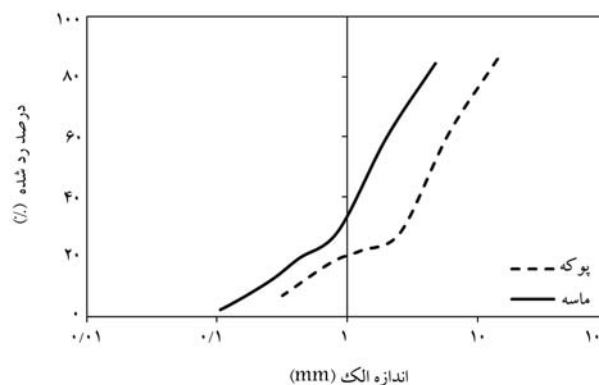


الف) الیاف ماکرو؛



ب) الیاف میکرو.

شکل ۱. نمونه هایی از الیاف پلی پروپیلن به کاررفته در مطالعه ی حاضر.



شکل ۲. منحنی دانه بندی پوکه و ماسه ی مورد استفاده.

و به مخلوط درون همزن اضافه شد. سپس نیمی دیگر از آب به صورت تدریجی به همزن در حال چرخش به همراه سیمان اضافه شد. در ساخت نمونه ها با الیاف بزرگ مقیاس از آنجا که این الیاف در مخلوط به یکدیگر نمی چسبند، حساسیت اختلاط در آن نمونه ها نسبت به نمونه های با الیاف کوچک مقیاس کمتر بود و به این ترتیب به راحتی در بتن پخش می شدند. نمونه هایی از پخش الیاف و ساخت نمونه ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همه ی نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از درون قالب به حوضچه ی آب منتقل شدند و در شرایط استاندارد به مدت ۲۸ روز باقی ماندند و سپس آزمایش شدند.

در این مطالعه، دو نوع آزمایش تعیین مقاومت فشاری و تعیین مقاومت دو نیم شدگی نمونه ها بررسی شد. به منظور تعیین منحنی تنش - جابه جایی نمونه ها و فراهم کردن امکان تعیین ظرفیت کرنشی و نیز مقدار جذب انرژی نمونه ها، آزمایش های تعیین مقاومت دو نیم شدگی توسط دستگاه UTM آزمایشگاه سازه ی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی و به صورت اعمال تحریک کنترل جابه جایی انجام شد. ولی به دلیل محدودیت ظرفیت دستگاه، آزمایش های تعیین مقاومت فشاری توسط جک های بتن شکن موجود در این آزمایشگاه انجام شد و به این ترتیب فقط حداکثر مقاومت فشاری نمونه ها تعیین شد.

۴. تحلیل و تفسیر نتایج

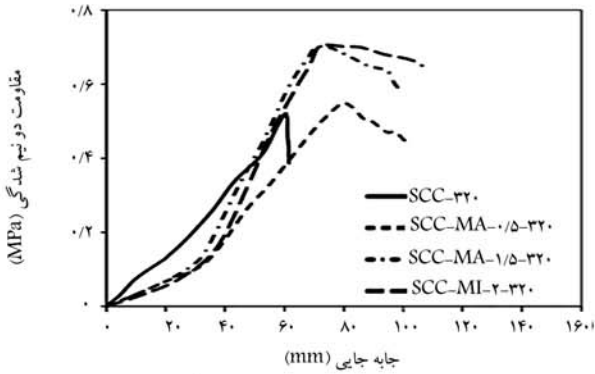
در این بخش نتایج آزمایش های تعیین مقاومت فشاری و تعیین مقاومت دو نیم شدگی نمونه ها ارائه می شود. این نتایج در قالب مودهای گسیختگی نمونه ها، منحنی های تنش - جابه جایی و مقاومت فشاری نمونه هاست. مثال هایی از مودگسیختگی نمونه ها پس از انجام آزمایش ها در شکل ۴ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، نمونه های فاقد الیاف دچار دو نیم شدگی شده که در قالب یک ترک عریض ظاهر شده و به این ترتیب، این نمونه ها به طور کامل به دو قسمت تقسیم شدند. ایجاد شکاف در این دسته از نمونه ها به صورت ناگهانی بود و پس از ایجاد شکاف، نمونه ها عملاً از خود مقاومتی نشان ندادند. این در حالی است که نمونه های دارای الیاف، رفتار شکل پذیری را از خود بروز دادند و انرژی در یافتی را در قالب تغییر شکل های متمرکز و کلی نمونه جذب کردند. بسته به میزان الیاف به کار رفته در این دسته از نمونه ها،

بهره گیری شد. از ماسه ی تریز با ارزش ماسه یی ۶۵ و از سیمان تیپ دو تهران استفاده شد. همچنین الیاف کوچک مقیاس از کارخانه ی تولیدی در ایران و الیاف بزرگ مقیاس به صورت وارداتی تأمین شد. الیاف بزرگ مقیاس دارای مقاومت کششی ۲۲۰ مگاپاسکال و طول و قطر به ترتیب ۴۰ تا ۶۰ میلی متر و ۴/۰ میلی متر بود. الیاف کوچک مقیاس دارای مقاومت کششی ۸۰ مگاپاسکال و طول و قطر به ترتیب ۱۵ تا ۱۸ میلی متر و ۳/۰ میلی متر بود. نمونه هایی از الیاف به کار رفته در مطالعه ی حاضر در شکل ۱ نمایش داده شده است.

طرح اختلاط بهینه با توجه به مقادیر متفاوت سیمان مصرفی براساس آزمایش های دانه بندی و تراکم براساس نشریه ی ۳۵۴^[۲۳] برای چند حالت متفاوت طرح اختلاط انجام شد که منجر به تعیین مقدار آب به سیمان بهینه برابر ۴۵/۰ با توجه به بیشینه ی میزان جرم حجمی و تراکم شد. منحنی دانه بندی پوکه و ماسه ی مورد استفاده در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین برای هماهنگی با بازار فروش و به دلیل ملاحظات اقتصادی در تولید محصول نهایی که بلوک های بتنی هستند، دانه بندی این اجزا اصلاح نشد.

۳.۳. روش آزمایش

به منظور ساخت نمونه ها ابتدا پوکه و ماسه به حالت اشباع با سطح خشک در آمده و درون همزن ریخته شد. سپس الیاف کوچک مقیاس در نیمی از آب پخش شد

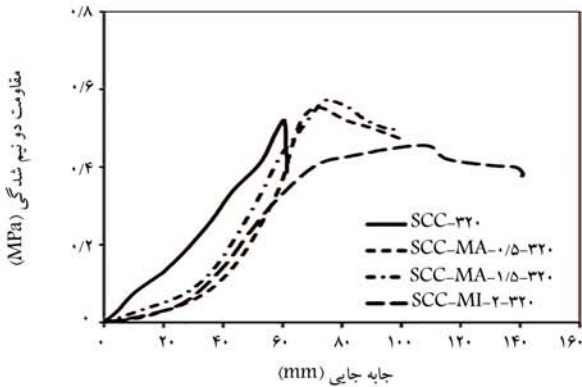


ب) نمونه دارای الیاف پس از آزمایش دو نیم شدگی؛

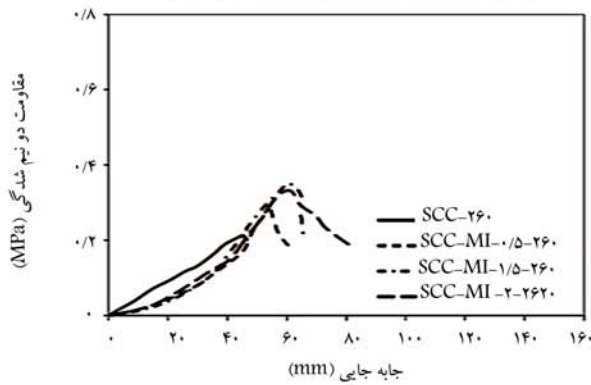


الف) نمونه فاقد الیاف پس از آزمایش دو نیم شدگی؛

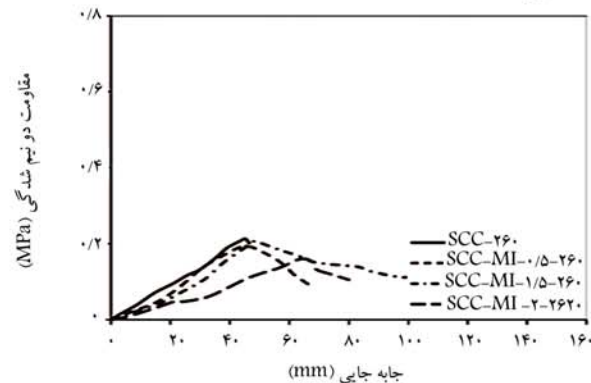
الف) نمونه ها با الیاف میکرو و میزان سیمان 320 kg/m^3



ب) نمونه ها با الیاف ماکرو و میزان سیمان 320 kg/m^3



ج) نمونه ها با الیاف میکرو و میزان سیمان 260 kg/m^3



د) نمونه ها با الیاف ماکرو و میزان سیمان 260 kg/m^3



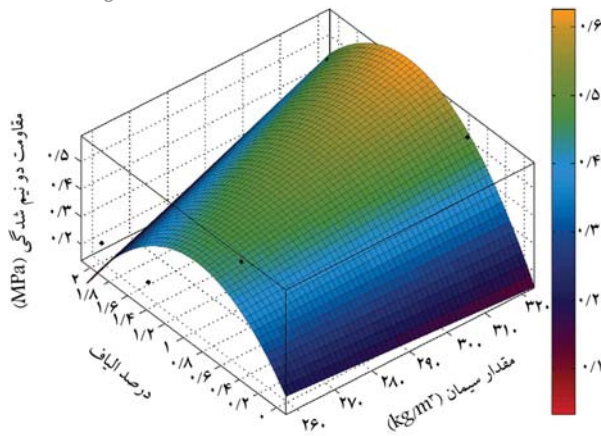
ج) نمونه دارای الیاف پس از آزمایش فشاری.

شکل ۴. مثال هایی از مودگسیختگی نمونه ها پس از انجام آزمایش ها.

بعضاً ترک مشهودی نیز در نمونه های استوانه ای در آزمایش های دو نیم شدگی دیده نشد. این امر در مورد نمونه های مکعبی در آزمایش های تعیین مقاومت فشاری نیز بین دو دسته نمونه های فاقد الیاف و دارای الیاف مشاهده شد؛ به طوری که با افزایش درصد الیاف، رفتار مصالح از حالت ترد به رفتار کاملاً شکل پذیر تغییر یافت.

نمودارهای تنش - جابه جایی نمونه ها در آزمایش دو نیم شدگی در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس در تمام نمونه های دارای الیاف، کاهش سختی اولیه مشاهده شده است. با این حال با افزایش جابه جایی ها و در نتیجه تغییر شکل ها و کرنش های تجربه شده توسط مصالح، به نظر می رسد سختی مماسی و نیز ثانویه به تدریج افزایش و تا بیشینه ی مقدار تنش ادامه می یابد. به عبارت دیگر وجود الیاف در نمونه ها سبب بروز رفتار سخت شدگی کرنشی می شود که این امر ناشی از وجود حفرات هوای اطراف الیاف است که با افزایش تغییر شکل ها و خروج این ریز حباب ها، باز توزیع تنش صورت می گیرد و سختی در مصالح به تدریج به مقدار سختی در نمونه ی شاهد فاقد الیاف نزدیک می شود. همچنین رفتار مصالح پلی پروپیلن از نظر ماهیتی به دلیل ساختار و جنس ماده دارای خاصیت فراکشسانی است که خود در روند کسب سختی در کرنش های بالا مؤثر است. نکته ی دیگری که به چشم می خورد توانایی الیاف کوچک مقیاس در افزایش قابلیت جذب انرژی و نیز افزایش مقاومت دو نیم شدگی نمونه هاست؛ در حالی که این امر در مورد نمونه های با الیاف بزرگ مقیاس، فقط در قالب افزایش نسبی قابلیت جذب انرژی بروز کرده است و افزایش مشهودی در مقاومت دو نیم شدگی ملاحظه نمی شود. دلیل این موضوع به شدت گسترش خرابی در فاز خمیری مرتبط است. نمونه های حاوی الیاف کوچک مقیاس با کنترل ریز ترک ها مانع از گسترش ریز ترک ها در فاز خمیر می شود و از این رو خمیر سالم هنوز مقاومت می کند. این در حالی است که در نمونه های حاوی الیاف بزرگ مقیاس ریز ترک ها به هم می پیوندند و ترک ها را به وجود آورده اند و عملاً در این فاز خرابی الیاف بزرگ مقیاس درگیر نشده اند. پس فقط الیاف بزرگ مقیاس با کنترل دهانه ی ترک ها و جلوگیری از فروپاشی بتن شروع به جذب انرژی می کنند و این مقدار تا آنجا ادامه می یابد تا الیاف از بتن رها شده یا پاره شوند که در این نمونه های بتنی با توجه به کم بودن مقاومت بتن عموماً جدایش الیاف از خمیر سیمان باعث فروپاشی بتن شده است. از دیگر نتایج

شکل ۵. نمودارهای تنش - جابه جایی نمونه ها در آزمایش دو نیم شدگی (مقادیر متوسط سه نمونه است).



شکل ۸. مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم در مقابل درصد الیاف بزرگ مقیاس و مقدار عیار سیمان.

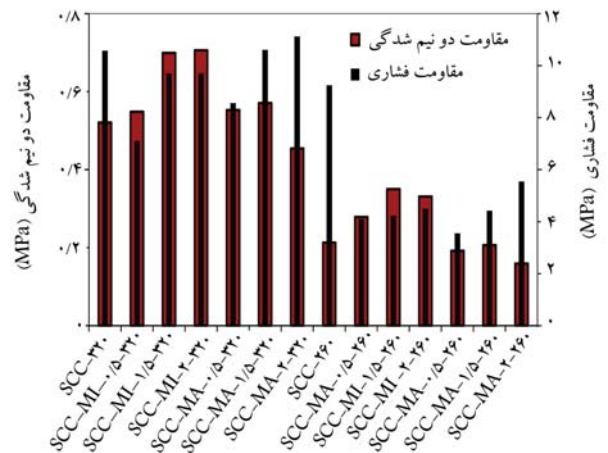
نیم شدگی کمتر و مقاومت فشاری کمی بیشتری هستند. از دیگر نتایج حاصل افزایش قابل توجه ظرفیت تغییر مکان نمونه‌ها با اضافه کردن الیاف است که با افزایش درصد آن، این ظرفیت نیز روندی افزایشی به خود می‌گیرد. با این حال مقدار این ظرفیت تا حدود زیادی به میزان خمیر سیمان وابسته است و با افزایش آن به شدت افزایش می‌یابد. روند نسبتاً مشابهی در مورد ظرفیت جذب انرژی در مورد نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

۵. تحلیل آماری نتایج

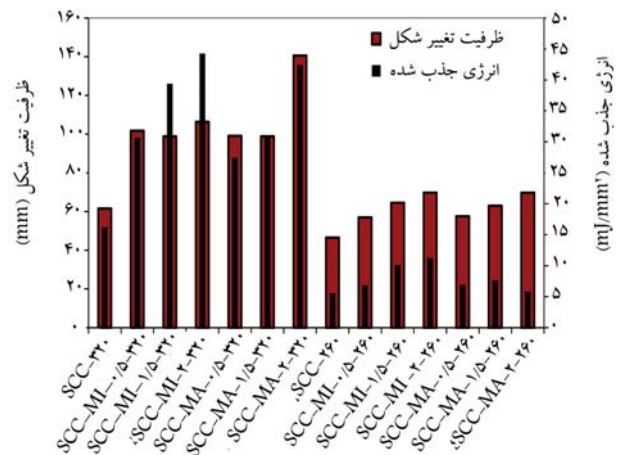
در ادامه نتایج به دست آمده به منظور تحلیل دقیق‌تر به صورت آماری بررسی می‌شود. با بررسی به عمل آمده همانطور که قبلاً بدان اشاره شد نتایج مقاومت فشاری دارای روند مشخصی نبود؛ پس فقط در ادامه نتایج به دست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم در مقابل متغیرهای مستقل عیار سیمان (X) و درصد الیاف (Y) در هر حالت بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس به صورت جداگانه بررسی خواهد شد. با بررسی نتایج مقاومت کشش غیرمستقیم در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف بزرگ مقیاس، همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود با افزایش درصد الیاف مقاومت کشش غیرمستقیم در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند.

میزان کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت به متغیر درصد الیاف غیرخطی است و معادله‌ی برازش شده بر متغیر مقاومت کششی غیرمستقیم در این گونه مخلوط‌ها با نکوویی برازش نسبتاً مناسب ($R^2 = 0/77$) توانست روند تغییرات متغیر وابسته را مدل‌سازی کند. معادله‌ی ۱ ارتباط متغیرهای مستقل با متغیر وابسته را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار بهینه‌ی درصد الیاف را می‌توان $0/88\%$ در عیار 26° کیلوگرم بر متر مکعب و $1/2\%$ در عیار 32° کیلوگرم بر متر مکعب با توجه به مشتق جزئی معادله‌ی ۱ بر حسب متغیر Y محاسبه کرد. این مقدار الیاف در هر دو عیار سیمان بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم را منتج شده است و با توجه به اینکه در بازه‌ی درصد‌های استفاده شده در ساخت مخلوط می‌باشد، از نظر آماری معتبر است.

$$MacrolTS = 0/4182 - 0/0006429x - 0/3556y + 0/003165xy - 0/2679y^2 \quad (1)$$



شکل ۶. مقادیر مقاومت دو نیم شدگی و فشاری نمونه‌ها.



شکل ۷. مقادیر ظرفیت تغییر شکل و انرژی جذب شده.

این بخش می‌توان به افزایش عملکرد الیاف میکرو در قالب افزایش قابلیت جذب انرژی با افزایش مقدار سیمان در بتن اشاره کرد؛ در حالی که افزایش نسبی مقاومت دو نیم شدگی ناشی از اضافه کردن الیاف میکرو تقریباً فارغ از مقدار سیمان به کار رفته در مخلوط است. همچنین نمونه‌های فاقد الیاف، فارغ از مقدار سیمان مورد استفاده، مقاومت دو نیم شدگی کمتر و شکل پذیری بسیار کمتری در مقایسه با نمونه‌های متناظر با الیاف داشته‌اند که این امر بیانگر تأثیر الیاف در بهبود عملکرد این مصالح است. خلاصه‌ی نتایج پارامترهای برگرفته از نمودارهای ارائه شده در شکل ۵، شامل مقاومت دو نیم شدگی، انرژی جذب شده در واحد سطح مصالح که حاصل محاسبه‌ی سطح زیر نمودار تنش - جابه‌جایی است، جابه‌جایی متناظر با 20% افت در مقدار تنش که متناظر با ظرفیت جابه‌جایی مصالح است به همراه پارامتر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان خمیر سیمان نقش تعیین‌کننده‌ی در تعیین مقاومت دو نیم شدگی و نیز مقاومت فشاری نمونه‌ها بازی می‌کند و با افزایش مقدار سیمان، مقادیر این مقاومت‌ها افزایش می‌یابد. با این حال نقش الیاف در تعیین مقاومت نمونه‌ها متفاوت است و از حالت تأثیر نسبی مثبت با افزایش درصد الیاف کوچک مقیاس در مقدار هر دو مقاومت فشاری و دو نیم شدگی تا تأثیر افزایش درصد الیاف بزرگ مقیاس در افزایش مقاومت فشاری و نیز کاهش نسبی مقاومت دو نیم شدگی نمونه‌ها متغیر است. همچنین نمونه‌های دارای الیاف بزرگ مقیاس در مقایسه با نمونه‌های متناظر با الیاف کوچک مقیاس دارای مقاومت دو

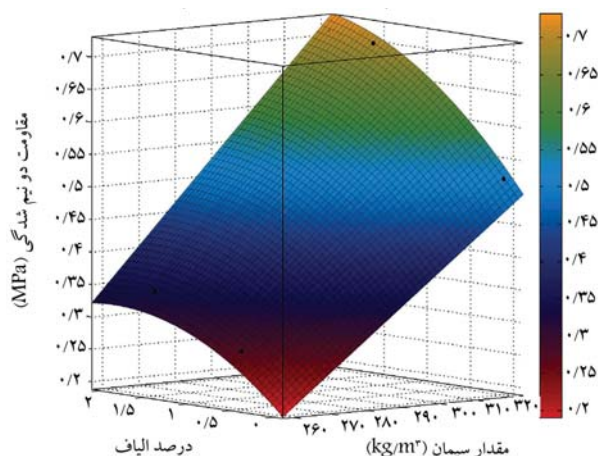
خمیرسیمان بر روی مشخصات مکانیکی مصالح بررسی شود. بر اساس مشاهدات انجام شده در این مطالعه:

۱. نمونه‌های فاقد الیاف در آزمایش‌های دو نیم‌شدگی و فشاری از هم گسیخته شدند و این گسیختگی به صورت ترد و ناگهانی بود. در حالی که نمونه‌های دارای الیاف اعم از کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس در این آزمایش‌ها پس از خسارت کامل دچار گسیختگی نشدند و الیاف موجود به خوبی در تأمین یکپارچگی اجزای نمونه موفق بودند. همچنین روند ایجاد خسارت در این نمونه‌ها به صورت تدریجی بود.

۲. از مهمترین نتایج حاصل می‌توان به توانایی الیاف کوچک‌مقیاس در افزایش قابلیت جذب انرژی و نیز افزایش مقاومت دو نیم‌شدگی نمونه‌ها اشاره کرد. در حالی که تأثیر الیاف بزرگ‌مقیاس، فقط در قالب افزایش نسبی قابلیت جذب انرژی و در نمونه‌های با مقدار سیمان ۳۲۰ کیلوگرم برترمکعب بروز کرده است و افزایش مشهودی در مقاومت دو نیم‌شدگی رخ نداد. دلیل کمتر شدن انرژی جذب شده در نمونه‌های با مقدار سیمان ۲۶۰ کیلوگرم برترمکعب که مشابه آن در مورد مقاومت دو نیم‌شدگی نمونه نیز به چشم می‌خورد، تجمع الیاف بزرگ‌مقیاس در خمیر سیمان است به طوری که سبب جذب خمیر به خود می‌شود که این امر تأثیری منفی بر روی چسبندگی بین خمیر و سنگدانه‌ها می‌گذارد. تأثیر تجمع الیاف ماکرو در نمونه‌های با مقدار سیمان کمتر خود را بیشتر نشان می‌دهد. این امر خصوصاً در مورد بتن‌های غلطکی که نسبت آب به سیمان کمتری در مقایسه با بتن‌های معمولی دارند، سبب تأثیرپذیری بیشتر آنها می‌شود. افزایش در مقاومت دو نیم‌شدگی با افزایش درصد الیاف کوچک‌مقیاس بیشتر می‌شود اما با افزایش مقدار سیمان، این افزایش کمتر می‌شود. به این ترتیب افزایش تا ۳۶٪ و ۵۷٪ به ترتیب برای نمونه‌های با مقدار سیمان ۳۲۰ و ۲۶۰ کیلوگرم برترمکعب می‌رسد.

۳. از دیگر نتایج حاصل در این مطالعه می‌توان به افزایش عملکرد الیاف میکرو در بهبود قابلیت جذب انرژی با افزایش مقدار سیمان در بتن اشاره کرد. با این حال، افزایش نسبی مقاومت دو نیم‌شدگی ناشی از اضافه کردن الیاف کوچک‌مقیاس تقریباً فارغ از مقدار سیمان به کار رفته در مخلوط است. افزایش در قابلیت جذب انرژی با افزایش درصد الیاف کوچک‌مقیاس بیشتر و نیز با افزایش مقدار سیمان، این افزایش بیشتر می‌شود. به این ترتیب این افزایش تا ۱۷۵٪ و ۱۲۰٪ به ترتیب برای نمونه‌های با مقدار سیمان ۳۲۰ و ۲۶۰ کیلوگرم برترمکعب میرسد. در حالی که افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های دارای الیاف بزرگ‌مقیاس برای نمونه‌های با مقدار سیمان ۳۲۰ برابر ۱۶۲٪ ولی برای نمونه‌های با مقدار سیمان ۲۶۰ قابل چشم‌پوشی بود.

۴. بر اساس نتایج به دست آمده از مقاومت دو نیم‌شدگی نمونه‌ها، مقدار بهینه‌ی درصد الیاف برای نمونه‌های با الیاف بزرگ‌مقیاس ۸۸٪ در عیار ۲۶۰ کیلوگرم برترمکعب و ۱/۲٪ در عیار ۳۲۰ کیلوگرم برترمکعب است. همچنین این مقدار برای نمونه‌های با الیاف بزرگ‌مقیاس ۱/۸۸٪ در عیار ۲۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۲/۵٪ در عیار ۳۲۰ کیلوگرم برترمکعب است.



شکل ۹. مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم در مقابل درصد الیاف کوچک‌مقیاس و مقدار عیار سیمان.

در شکل ۹ مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف کوچک‌مقیاس نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، تأثیر عیار سیمان یا به عبارتی حجم خمیر بر عملکرد مقاومت کششی غیرمستقیم اینگونه مخلوط‌ها برای الیاف کوچک‌مقیاس بسیار بیشتر از الیاف بزرگ‌مقیاس است. معادله‌ی ۲ مقاومت کششی غیرمستقیم در مقابل درصد الیاف میکرو (Y) و مقدار عیار سیمان (X) را نشان می‌دهد. این معادله از کیفیت برآزش بسیار خوبی برخوردار است ($R^2 = 0.98$).

$$MicroITS = 1/0.07 + 0/0.4715x - 0/0.5321y + 0/0.007104xy - 0/0.3496y^2 \quad (2)$$

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار بهینه‌ی درصد الیاف را می‌توان ۱/۸۸٪ در عیار ۲۶۰ کیلوگرم برترمکعب و ۲/۵٪ در عیار ۳۲۰ کیلوگرم برترمکعب با توجه به مشتق جزئی معادله‌ی ۲ برحسب متغیر Y محاسبه کرد. البته با توجه به اینکه این نتایج نسبت به مقادیر الیاف مورد بررسی در ساخت طرح اختلاط بیشتر است، طبیعتاً از نظر آماری برون‌یابی شده است و نیاز به اعتبارسنجی دارد. با مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های بتنی ساخته شده با الیاف ماکرو و میکرو مشخص است که تأثیر الیاف کوچک‌مقیاس بر افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی نسبت به الیاف بزرگ‌مقیاس بسیار بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان در ریزی این الیاف نسبت به الیاف بزرگ‌مقیاس و پخش بهتر و هماهنگ‌تر در ماتریس خمیر دانست.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تعداد ۸۴ نمونه‌ی استوانه‌یی و مکعبی تحت آزمایش‌های دو نیم‌شدگی و فشاری قرار گرفتند تا میزان تأثیر سه پارامتر نوع الیاف، مقدار الیاف، و نیز مقدار

منابع (References)

1. Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B. and Kohani Khoshk-bijari, R. "Effect of fly ash and silica fume on transition

zone, pore structure and permeability of concrete", *Magazine of Concrete Research*, **70**(10), pp. 519-532 (2017).

2. Hashemi, S.H. and Hosseini, S.E. "Study on the effects

- of polypropylene fibers on the concrete-bar bond behavior in self-compacting concrete”, *Omran Sharif*, **34**(1), pp.97-104 (in Persian) (2015).
3. Khalid, F.S., Irwan, J.M., Ibrahim, M.W. and et al. “Splitting tensile and pullout behavior of synthetic wastes as fiber-reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, **171**, pp. 54-64 (2018).
 4. Abrishambaf, A., Barros, J.A. and Cunha, V.M. “Tensile stress-crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests”, *Cement and Concrete Composites*, **57**, 153-165 (2015).
 5. Majain, N., Rahman, A.B.A., Adnan, A. and et al. “Pull-out behaviour of ribbed bars in self-compacting concrete with steel fibers”, *Materials Today: Proceedings*, **39**(1), pp.1-7 (2020).
 6. Sunil, J. and Kumar, M.R. “Effect of fibers on the compressive strength of hollow concrete blocks”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **9**(2), pp.481-490 (2018).
 7. Bagheri, A., Gorgani, F., Jamali, A. and et al. “On the comparison of macro polymeric and steel fibers in reducing the shrinkage cracks in concrete”, *Omran Sharif*, **36**(1), pp.11-19 (in Persian) (2020).
 8. Shi, F., Pham, T. M., Hao, H. and et al. “Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths”, *Construction and Building Materials*, **262**, pp. 1-13 (2020).
 9. Wang, X.H., Zhang, S.R., Wang, C. and et al. “Effect of steel fibers on the compressive and splitting-tensile behaviors of cellular concrete with millimeter-size pores”, *Construction and Building Materials*, **221**, pp. 60-73 (2019).
 10. Guo, H., Tao, J., Chen, Y. and et al. “Effect of steel and polypropylene fibers on the quasi-static and dynamic splitting tensile properties of high-strength concrete”, *Construction and Building Materials*, **224**, pp. 504-514 (2019).
 11. Li, X., Zhang, Y., Shi, C. and et al. “Experimental and numerical study on tensile strength and failure pattern of high performance steel fiber reinforced concrete under dynamic splitting tension”, *Construction and Building Materials*, **259**, pp. 1-17 (2020).
 12. Subair, F.C. and Paul, M.M. “An experimental study on the mechanical properties of steel fibered sand replaced foamed concrete”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **3**(9), pp.1-4 (2016).
 13. Saghafi, M.H., Shariatmadar, H. and Kheyroddin A. “Experimental study on fibrous cement composites”, *Omran Sharif*, **34**(1), pp. 37-46 (in Persian) (2019).
 14. Qin, Y., Zhang, X., Chai, J. and et al. “Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, **194**, pp. 216-225 (2019).
 15. Behnood, A., Verian, K.P. and Gharehveran, M.M. “Evaluation of the splitting tensile strength in plain and steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength”, *Construction and Building Materials*, **98**, pp. 519-529 (2015).
 16. Alwesabi, E.A., Bakar, B.A., Alshaikh, I.M. and et al. “Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre”, *Construction and Building Materials*, **233**, pp.1-9 (2020).
 17. Karimi, M. and Hashemi, S.H. “Study on the behavior of concrete beams without stirrups having steel fibers”, *Omran Sharif*, **33**(2), pp. 85-94 (in Persian) (2017).
 18. Golestan, A. and Hajiani Boushehrian, A. “Investigation the application of the steel fiber in special steel fiber concrete and its effect on concrete permeability and compression strength parameters (2017).
 19. Vu, H.H., Do, T.G. and Nguyen, T.T. “The application of polypropylene fiber for reinforced concrete beams and slabs”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **869**(7), pp.1-7 (2020).
 20. Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M. “Numerical and experimental study of in-situ methods to evaluate the mechanical properties of fiber-reinforced mortars”, *AUT Journal of Civil Engineering*, **12**(2), pp.1-20 (2020).
 21. ASTM C39 / C39M-04a, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, www.astm.org.
 22. BSI. BS EN 12390-2: 2009. Testing Hardened Concrete. Making and Curing Specimens for Strength Tests (2009).
 23. Code 354. Guideline for design and construction of rolled compacted concrete pavements. Vice presidency for strategic planning and supervision, Tehran, Iran (2003).