

تأثیر پیش فشار بر چسبندگی بین بتن و ملات‌های مسلح به الیاف و ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها با به کارگیری آزمون‌های درجا

علی صابری وزنه* (دانشجوی دکتری)

محمود نادری (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

فصل مشترک بین بتن و ملات تعمیری از اهمیت فراوانی برخوردار است. جمع‌شدگی و عدم تراکم صحیح ملات باعث ایجاد حفره‌ها و در نتیجه افت چسبندگی می‌شود. لذا در این نوشتار با به کارگیری آزمون‌های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» و همچنین عکسبرداری و تحویل با میکروسکوپ الکترونی روبشی و الگوی پراش اشعه‌ی ایکس، تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و پیش فشار بر مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات و بتن بررسی شده است. همچنین با ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها به صورت درجا، نمودارهای کالیبراسیون رسم و معادلات برای تبدیل نتایج آزمون‌های فوق به مقاومت فشاری ملات‌های مسلح به الیاف ارائه شده است. در ادامه نحوه‌ی توزیع تنش‌ها و شکست در ملات با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. نتایج حاصله بیانگر تأثیر مثبت پیش فشار و الیاف بر چسبندگی است. همچنین همبستگی بالایی بین آزمون‌های درجا و آزمایشگاهی مشاهده شد.

ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir
profmahnaderni@eng.ikiu.ac.ir

واژگان کلیدی: پیش فشار، آزمون‌های درجا، چسبندگی، الیاف.

۱. مقدمه

بتن و ملات به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی و سازه‌یی، رفتاری ترد دارند و برخلاف فولاد، یک ماده غیر همگن و غیرهمسان است. رفتار مصالح ساخته شده با سیمان در کشش و فشار با یکدیگر متفاوت بوده و مقاومت فشاری آنها بسیار بیشتر از مقاومت کششی است. یک راهکار مؤثر برای افزایش شکل‌پذیری بتن و ملات استفاده از الیاف در آنهاست. الیاف باعث بهبود رفتار بتن تحت تنش‌های فشاری وارده شده^[۱] در نمودار تنش - کرنش تأثیر مثبت می‌گذارد.^[۲]

در تحقیقی که Shaker و همکاران^[۳] انجام دادند مشخص شد که افزودن ۰/۵ درصد حجمی الیاف باعث افزایش مقاومت کششی ملات به مقدار ۷/۲۱ درصد می‌شود. Mesbah و همکاران^[۴] در تحقیقی روی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر ترک‌خوردگی داخل ملات‌ها، مشاهده کردند که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث به تأخیر انداختن توسعه‌ی ترک‌ها در داخل ملات شده و از بازشدگی ترک‌ها جلوگیری می‌کند. Sadrmontaz و همکاران^[۵] در تحقیقی روی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر ملات‌ها نتیجه گرفتند که الیاف پلی‌پروپیلن باعث بهبود مقاومت فشاری و خمشی ملات‌ها می‌شود؛ البته افزایش حجم الیاف بیشتر از ۰/۳ درصد باعث تأثیر منفی در مشخصات ملات‌ها می‌شود. تحقیقات متعدد نشان داده‌اند

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۲۶.

DOI:10.24200/J30.2021.56931.2869

که افزودن بیش از حد الیاف، باعث تأثیر منفی روی مشخصات مصالح سیمانی می‌شود.^[۶-۹]

همچنین مصالح کامپوزیتی جدید اخیراً برای بهبود رفتار و چسبندگی ملات و بتن مورد استفاده قرار گرفته است. پلیمر و سیمان تقویت شده با الیاف به دلیل مزایایی که در مقایسه با مصالح سنتی ارائه می‌دهند، موفقیت‌هایی زیادی در مقاوم‌سازی و ترمیم سازه‌ها کسب کرده‌اند. استفاده‌ی آسان و نسبت مقاومت به وزن بالا، برخی از عوامل اصلی موفقیت این فناوری‌های جدید است.^[۱۰] از پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه می‌توان برای مقاوم‌سازی ستون‌های سازه‌های بتن مسلح استفاده کرد.^[۱۱] گروت مسلح به فولاد از مصالح تعمیری جدید دیگری است که باعث بهبود چسبندگی با بتن می‌شود.^[۱۲]

در گذشته، تحقیقاتی با استفاده از آزمون «انتقال اصطکاک» برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی بین ملات و بتن و همچنین ارزیابی مقاومت فشاری بتن استفاده شده است. در تحقیقی در خصوص بررسی چسبندگی بین ملات خود متراکم و بستر بتنی، با استفاده از آزمون «انتقال اصطکاک» نتیجه گرفته شد که بستر اشباع با سطح خشک باعث افزایش مقدار چسبندگی می‌شود.^[۱۳] در تحقیق دیگری در خصوص تأثیر شرایط مختلف سطح بستر بر چسبندگی بین لایه‌ی تعمیری و بستر بتنی با استفاده از آزمون «انتقال اصطکاک» مشاهده شد که بالاترین چسبندگی بین ملات و بتن برای حالت بستر اشباع با سطح خشک حاوی دوغاب سیمان

مقاومت کشسانی	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت برشی	زمان گیرش	
			۲۵°C	۳۵°C
۱۲۷۵۰ مگاپاسکال	۷۰ مگاپاسکال	۱۵ مگاپاسکال	۴ ساعت	۱۰ ساعت

جدول ۲. نسبت‌های وزنی بتن بستر (کیلوگرم بر متر مکعب).

فوق روان‌کننده	نسبت آب به سیمان	آب	ماسه	شن	سیمان
۲/۶۱	۰/۳۵	۱۸۷	۸۳۵	۶۶۴	۵۳۴

فشاری ملات‌ها در سنین متفاوت و به صورت درجا ارزیابی شده است. با اندازه‌گیری ضریب همبستگی و رسم نمودارهای کالیبراسیون، معادلات تبدیل نتایج آزمون‌های درجا به آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. برای صحت‌سنجی نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS توزیع تنش‌ها و ترک‌ها در اعمال آزمون‌های انتقال اصطکاک و کشیدن از سطح روی ملات‌ها نشان داده شده است.

۲. کارهای آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح مصرفی

مواد و مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از: سیمان تیپ ۲ محصول کارخانه سیمان آبیک، ماسه‌ی معادن شهریار، آب آشامیدنی شهر قزوین، شن معادن قزوین، چسب رزین اپوکسی و مواد عمل‌آورنده از نوع پلی‌ولفین. دانه‌بندی سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C ۱۳۶^[۲۷] انجام شد. میزان جذب آب شن و ماسه براساس استانداردهای ASTM C ۱۲۷^[۲۸] و ASTM C ۱۲۸^[۲۹] به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۶ درصد به دست آمد. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این که در آزمون «کشیدن از سطح»، چسباندن استوانه‌ی فولادی روی ملات‌ها نیازمند چسب مخصوصی است که علاوه بر مقاومت بالا، چسبندگی بالایی برای چسباندن فولاد به ملات داشته باشد، در این تحقیق از یک چسب رزین اپوکسی با مشخصات ثبت شده در جدول ۱ استفاده شد. این چسب به صورت دوجزئی است و برای استفاده باید به مقدار مساوی از هر جزء را با یکدیگر مخلوط، و روی سطح فولاد اعمال کرد، و سپس استوانه فولادی را روی سطح مورد نظر ملات قرار داد. با توجه به این که مدت زمان گیرش چسب حدود ۱۰ ساعت است، نباید زودتر از این موعد اقدام به انجام آزمون کنیم، چرا که چسب به گیرش مورد نظر نرسیده و در هنگام انجام آزمایش «کشیدن از سطح»، امکان جدا شدن استوانه‌ی فلزی از روی ملات به خاطر شکست چسب وجود دارد.

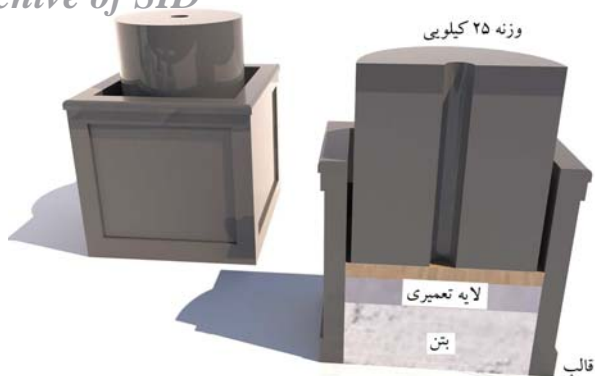
طرح اختلاط بتن بستر^[۳۰] نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. برای ساخت بتن بستر، دانه‌بندی سنگدانه را تعیین و جذب آب شن و ماسه را اندازه‌گیری کردیم. با توجه به این که مقدار رطوبت سنگدانه‌ها ثابت نیست، تمامی سنگدانه‌ها ابتدا به مدت ۷۲ ساعت در فضای آزمایشگاه رها شدند و بعد از آن اقدام به ساخت بتن شد. همچنین چگالی سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک به دست آمد. در ادامه با توجه به اسلامپ و مقاومت فشاری مورد نیاز، اقدام به تعیین نسبت‌های وزنی مصالح شد. برای ساخت ملات‌های تعمیری از نسبت سیمان به ماسه برابر ۱

است.^[۱۴] در این نوشتار نیز از سطح بستر اشباع به همراه دوغاب سیمان استفاده شده است. در تحقیقی دیگر که با استفاده از آزمون «انتقال اصطکاک» برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی بین ملات و بتن تحت عمل‌آوری‌های مختلف انجام پذیرفت مشاهده شد که عمل‌آوری باعث افزایش حدود ۲/۵ برابری چسبندگی می‌شود.^[۱۵]

یکی از عوامل مؤثر در افزایش چسبندگی بین ملات و بتن، تراکم مناسب ملات تعمیری است. فصل مشترک ملات و بستر دارای اهمیت فراوانی است، زیرا عدم تراکم مناسب باعث ایجاد حفره‌های ریز بین سطح مشترک شده و یکی از عوامل اصلی در کاهش مقاومت فشاری و چسبندگی است. در تحقیقی روی تأثیر عملیات فشرده‌سازی بر مقاومت بتن خودمتراکم مشاهده شد که تراکم مناسب باعث افزایش حدود ۵ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌شود.^[۱۶] در تحقیقی دیگر در خصوص ارزیابی مقاومت بتن‌های تحت فشرده‌سازی متفاوت، نتیجه گرفته شد که نتایج مقاومت فشاری به دست آمده از آزمون‌های «چکش اشमित»، «اولتراسونیک» و «بیرون کشیدن» به شدت متأثر از روش فشرده‌سازی و تراکم است.^[۱۷] همچنین در تحقیقی دیگر روی تأثیر فشرده‌سازی بر مقاومت فشاری بتن‌های معمولی مشخص شد که تراکم مناسب باعث افزایش مقاومت فشاری بین ۴ تا ۸ مگاپاسکال می‌شود.^[۱۸]

لذا در این تحقیق با اعمال پیش‌فشارهای متفاوت روی ملات تعمیری مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن، تأثیر آن بر مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی با استفاده از آزمون‌های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در ادامه برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌های تعمیری، از آزمون‌های درجا و نیمه مخرب استفاده شده است. بیشتر تحقیقات انجام شده به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات‌های تعمیری، با روش‌های مخرب و محدود آزمایشگاهی است. در صورتی که آزمون‌های آزمایشگاهی برای شرایط خاص بوده و عواملی از جمله شرایط واقعی سازه، عدم توجه به نوع عمل‌آوری، رطوبت و تفاوت دما نمی‌تواند در این آزمون‌ها معرف ملات به کار رفته در قسمت‌های مختلف سازه باشد. از آزمون‌های غیرمخرب می‌توان به چکش اشमित^[۱۹] و روش اولتراسونیک^[۲۰] اشاره کرد اما این روش‌ها به‌صورت غیرمستقیم، مقاومت را تعیین می‌کنند. آزمون‌های مخرب، مانند مغزه‌گیری^[۲۱] و بیرون کشیدن^[۲۲]، نیز به دلیل خسارت‌هایی که به سازه وارد می‌کنند و همچنین به علت عدم قابلیت تکرار، با محدودیت مواجه‌اند. البته در تحقیقات گذشته مشخص شده که مقاومت فشاری مغزه‌های گرفته شده از سازه، کمتر از مقاومت فشاری واقعی سازه است.^[۲۳] با توجه به این که در آزمون‌های نیمه مخرب مانند انتقال اصطکاک^[۲۴]، پیچش^[۲۵] و کشیدن از سطح^[۲۶]، شکست در خود جسم مورد آزمایش اتفاق می‌افتد، نتایج آنها نسبت به آزمون‌های غیرمخرب اعتبار بیشتری دارد.

در این تحقیق در قسمت اول با استفاده از آزمون‌های درجا، تأثیر پیش‌فشار بر چسبندگی بین ملات‌های مسلح به الیاف و بتن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر الیاف روی جمع‌شدگی و چسبندگی برشی و کششی ملات‌ها بر بستر بتنی ارائه شده است. در ادامه با استفاده از آزمون‌های فوق، مقاومت



شکل ۱. اعمال فشار به ملات‌ها.



شکل ۲. اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی و کششی.

میلی‌متر روی سطح محل آزمون ایجاد کرده و سپس دستگاه فلزی مربوط به آزمون «انتقال اصطکاک» روی مغزه قرار گرفت و با استفاده از یک ترکمتر معمولی، به دستگاه مذکور لنگر پیچشی اعمال می‌شود تا مغزه جزئی دچار شکست شود. برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی بین لایه‌های تعمیری و سطوح بتنی با روش «انتقال اصطکاک»، ابتدا باید مغزه جزئی در سطح لایه تعمیری به گونه‌ی ایجاد کرد که عمق مغزه جزئی حدود پنج میلی‌متر به درون بستر بتنی ادامه یابد (شکل ۲ الف). برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها توسط آزمون «کشیدن از سطح» نیز یک استوانه‌ی فولادی به قطر ۵۰ میلی‌متر روی سطح ملات چسبانده می‌شود، سپس با استفاده از دستگاه به استوانه نیروی کششی اعمال می‌شود تا استوانه از سطح ملات جدا شود. برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی کششی با این روش نیز ابتدا مغزه‌ی جزئی به قطر ۵۰ میلی‌متر تا داخل لایه بتن بستر انجام می‌گیرد (شکل ۲ ب).

برای به دست آوردن میزان جمع‌شدگی نمونه‌ها از استانداردهای ASTM C ۱۵۷ [۳۱] و ASTM C ۴۹۰ [۳۲] استفاده شده است. قالب‌های جمع‌شدگی ملات به صورت منشوری با مقطع مربعی با بعد ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۸۵ میلی‌متر است. مقایسه‌گر طول، برای تعیین تغییر طول نمونه‌ها باید به شکلی طراحی شده باشد که نمونه بتواند داخل آن جای بگیرد و تماس کامل و مناسبی با گل‌میخ‌های آزمون داشته باشد. در شکل ۳ آزمایش تعیین جمع‌شدگی نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات‌ها طبق استاندارد ASTM C ۱۰۹ [۳۳]، از نتایج متوسط ۶ نمونه‌ی مکعبی استاندارد ۵۰ میلی‌متری استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقاومت کششی ملات‌ها در حالت خمش طبق استاندارد ATSM ۳۴۸ C [۳۴]، متوسط ۳ نمونه منشوری به ابعاد $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر استفاده شد.

جدول ۳. مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن.

وزن مخصوص (کیلوگرم بر لیتر)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول کشسانی (گیگاپاسکال)	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)
۰/۹۱	۳۸۰	۷	۱۲	۰/۲۲

به ۳ و نسبت آب به سیمان نیز برابر ۵/۰ استفاده شد. الیاف به کار گرفته شده از نوع پلی‌پروپیلن است که مقدار مصرف الیاف در ساخت ملات‌ها مطابق با کتاب «طرح مخلوط ملای بتن» [۳۰]، برابر ۳/۰ درصد حجمی است. مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

۲.۲. ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های استاندارد آزمایشگاهی را برای تعیین مقاومت فشاری ملات‌ها تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در قالب قرار دادیم. سپس آنها را از قالب خارج و تا زمان آزمایش داخل آب گذاشتیم. نمونه‌های مقاومت فشاری ملات‌ها به صورت مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر است. همچنین از نمونه‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری مقاومت کششی ملات‌ها در حالت خمش به صورت منشوری به ابعاد $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای عمل‌آوری داخل آب قرار گرفتند و در سنین مذکور از آب خارج و تحت آزمایش قرار گرفتند. همزمان نمونه‌های مورد نیاز برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها را با به کارگیری آزمون‌های نیمه مخرب تهیه و داخل آب قرار دادیم. نمونه‌های مذکور به صورت مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر است. این نمونه‌ها نیز در زمان‌های ۷، ۴۲ و ۹۰ روز داخل آب قرار گرفتند و در سنین مذکور از عمل‌آوری خارج و تحت آزمایش قرار گرفتند.

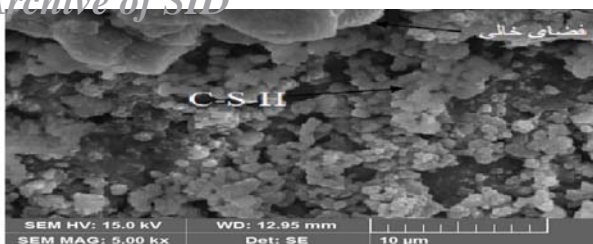
برای تعیین مقاومت چسبندگی ملات به ضخامت ۲۵ میلی‌متر روی بستر بتنی اعمال شد. برای ساخت بتن بستر، ابتدا نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری ساخته شد. نمونه‌های بتن را با استفاده از اهر بتن بر، به سه قسمت مساوی با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تقسیم کردیم. سپس ملات‌ها را روی بتن بستر اعمال و در عمل‌آوری داخل آب قرار دادیم. مدت هفت روز برای عمل‌آوری نمونه‌ها، به منظور اندازه‌گیری چسبندگی بین ملات و بتن برابر در نظر گرفته شد. بعد از گذشت هفت روز، نمونه‌ها را از آب خارج و در فضای آزاد گذاشتیم. همچنین آزمایشات روی نمونه‌ها در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز انجام پذیرفت.

برای اعمال پیش فشار روی ملات‌های تعمیری، فشارهای ۱/۰، ۵/۰، ۵ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به مدت ۲۴ ساعت روی ملات‌ها اعمال شد. به عبارتی به ترتیب حدود ۲۵، ۱۰۰، ۱۱۰۰ و ۲۲۵۰ کیلوگرم وزنه روی ملات‌ها قرار دادیم. وزنه‌های ۲۵ و ۱۰۰ کیلوگرمی مطابق شکل ۱ به صورت دستی روی ملات‌ها قرار گرفت و وزنه‌های ۱۱۰۰ و ۲۲۵۰ توسط جک فشاری بتن شکن اعمال شد.

برای اندازه‌گیری مقدار جمع‌شدگی نمونه‌ها، از قالب‌های جمع‌شدگی ملات به صورت منشوری با مقطع مربعی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۸۵ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های جمع‌شدگی پس از ساخت، به مدت هفت روز تحت عمل‌آوری داخل آب قرار گرفتند و سپس از آب خارج و در فضای آزاد رها شدند. آزمایشات جمع‌شدگی روی نمونه‌های منشوری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز انجام پذیرفت.

۳.۲. روش‌های آزمایشگاهی

در آزمون «انتقال اصطکاک» برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها، ابتدا با به کارگیری دستگاه کارگیری، یک مغزه جزئی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵

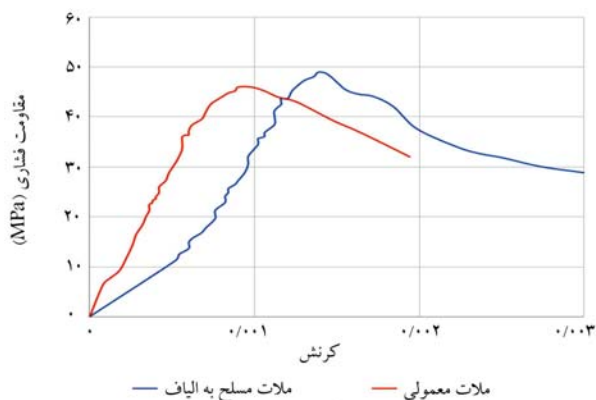


الف) ملات بدون الیاف؛



ب) ملات مسلح به الیاف.

شکل ۵. عکس‌های SEM از ملات‌ها.



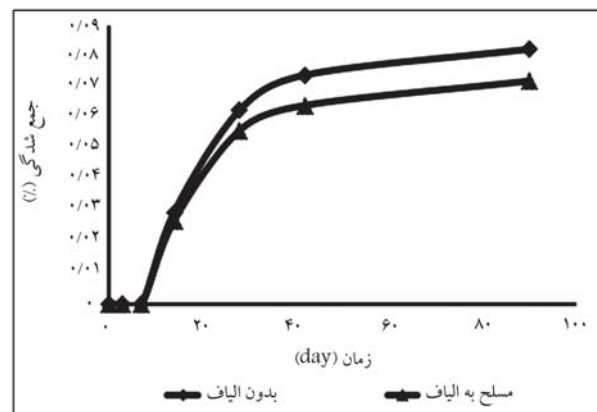
شکل ۶. رفتار فشاری ملات‌ها در دو حالت با و بدون الیاف.

می‌شود که این امر باعث تأخیر ترک‌خوردگی و همچنین انتقال تنش‌های وارده در عرض مسیر ترک‌ها می‌شود، به گونه‌ای که تحمل تغییر شکل‌های بسیار بزرگتر، تحت تنش‌های اوج، را برای ملات ممکن می‌سازد. در شکل ۶ رفتار فشاری ملات ساده و ملات مسلح به الیاف مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۶ شاهد افزایش طاقت ملات در فشار برای نمونه مسلح به الیاف هستیم. بیشینه‌ی تنش‌ی که نمونه‌ی بدون الیاف تحمل می‌کند، برابر ۴۶ مگاپاسکال و در کرنش ۰/۰۰۱ است در صورتی که شکست نمونه‌ی حاوی الیاف، در تنش‌ی برابر ۴۸/۸ مگاپاسکال و کرنش ۰/۰۰۱۴ رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییر شکل بیشینه‌ی که نمونه‌ی بدون الیاف می‌تواند تحمل کند حدود ۴۵ درصد کمتر از نمونه‌ی مسلح به الیاف است. در جدول ۴ مقاومت فشاری ملات‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزودن الیاف باعث بهبود رفتار فشاری ملات‌ها در سنین مختلف شده است. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طور میانگین باعث افزایش مقاومت فشاری ملات‌ها به مقدار ۴/۸ درصد شده است. در جدول ۵ مقاومت کششی ملات‌ها در حالت خمش نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵ درمی‌یابیم که افزودن الیاف باعث بهبود مقاومت کششی ملات‌ها در حالت خمش شده است. مقدار این افزایش با افزودن الیاف به طور میانگین برابر ۲/۱ درصد شده است.



شکل ۳. انجام آزمون جمع‌شدگی ملات‌ها.



شکل ۴. نمودار جمع‌شدگی ملات‌ها.

۳. نتایج و تحلیل آنها

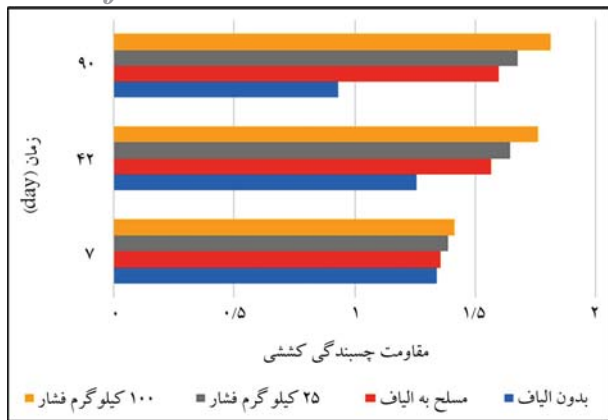
۳.۱. جمع‌شدگی حاصل از خشک شدن

در شکل ۴ جمع‌شدگی ملات نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود مقدار جمع‌شدگی ۹۰ روزه برای ملات ساده برابر ۰/۰۸۲۲ درصد است. برای همین ملات و با افزودن الیاف، مقدار جمع‌شدگی ۹۰ روزه برابر ۰/۰۷۲۰ درصد شده است (به طور متوسط به مقدار ۱۱/۱ درصد کاهش یافته است). برای بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر ملات‌ها و بررسی ساختار میکروسکوپی ملات‌ها، از عکسبرداری و آنالیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ استفاده شد (شکل ۵).

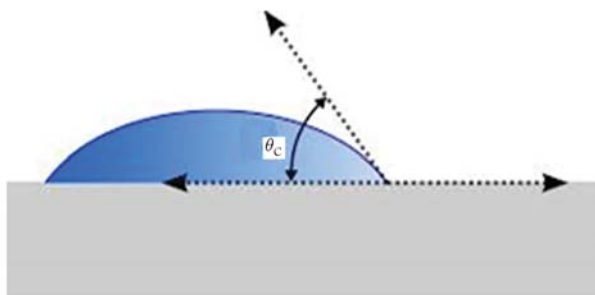
چنان که در شکل ۵ الف مشاهده می‌شود خمیر هیدراته شده در حال تشکیل است که در شکل مذکور بلورهای بزرگ مجزا با فرم منشوری چند وجهی نمایانگر هیدروکسید کلسیم یا پرتلندایت است. اما یکسری فضاهای خالی در ملات مشاهده می‌شود که به علت عدم تکمیل نشدن فرایند هیدراسیون سیمان به صورت کامل است که می‌تواند تأثیر به سزایی در کاهش مقاومت ملات بگذارد. مطابق شکل ۵ ب با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ملات، مشاهده می‌شود که فرایند هیدراسیون سیمان و تشکیل ژل سیلیکاتی C-S-H در کنار الیاف پلی‌پروپیلن به خوبی انجام شده و باعث یکنواختی بهتر ترکیب ملات شده است. به عبارتی افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث پیوستگی بهتر ملات شده است.

۳.۲. تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری و کششی ملات‌ها

مقدار مشخصی از الیاف، باعث افزایش طاقت مصالح در برابر تنش‌های وارده



شکل ۸. مقاومت چسبندگی کششی.



شکل ۹. معیار زاویه‌ی تماس. [۳۵]

از آزمون «کشیدن از سطح» برای تعیین مقاومت چسبندگی کششی ملات‌ها نشان داده شده است.

چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزودن الیاف به ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب به مقدار ۱۹/۶ و ۴۱/۷ درصد شده است. اعمال ۱/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۲/۵، ۵/۲ و ۴/۸ درصد شده است. همچنین اعمال پیش فشار ۵/۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش چسبندگی در سنین مذکور به ترتیب برابر ۴/۱، ۱۲/۷ و ۱۳/۳ درصد شده است.

در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که نمونه‌های بدون الیاف با گذشت زمان دچار افت در چسبندگی شده است. زیرا مقدار جمع‌شدگی ملات‌ها افزایش یافته و ملات دچار ترک‌خوردگی شده است. همین امر سبب کاهش مقدار چسبندگی شده است. اما در نمونه‌های الیافی، با توجه به سازوکار تأثیر الیاف بر ملات، شاهد افزایش چسبندگی به دلیل کنترل افزایش عرض ترک‌ها توسط الیاف هستیم. یکی از مهمترین نظریه‌های چسبندگی، نظریه‌ی جذب فیزیکی است که در چسبندگی بین ملات و بتن نقش اساسی دارد. بر اساس این نظریه، بهترین پخش‌شدگی چسب (که در اینجا خمیره سیمان است) روی سطح جامد (که در اینجا همان سطح بتن بستر است) با معیار زاویه‌ی تماس معلوم می‌شود. این معیار در شکل ۹ نشان داده شده است.

از مفهوم زاویه‌ی تماس می‌توان این گونه برداشت کرد که هر قدر خمیره‌ی سیمان ملات به صورت مناسب متراکم شود، ضمن این که تخلل آن کاهش می‌یابد، باعث تماس بیشتر سطح اجزای ملات با سطح بتن شده و در نتیجه چسبندگی را افزایش می‌دهد. برای بررسی تأثیر تراکم بر کاهش حفره‌ها بین ملات و بستر از عکسبرداری

جدول ۴. مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی (مگاپاسکال).

ملات	روز ۷	روز ۴۲	روز ۹۰
بدون الیاف	۳۴/۱	۵۱/۲	۵۴/۴
مسلح به الیاف	۳۵/۸	۵۳/۱	۵۶/۶

جدول ۵. مقاومت کششی ملات‌ها در حالت خمش (مگاپاسکال).

ملات	روز ۷	روز ۴۲	روز ۹۰
بدون الیاف	۸/۶	۹/۷۱	۱۰/۱۱
مسلح به الیاف	۸/۸۵	۹/۸۱	۱۰/۲۷

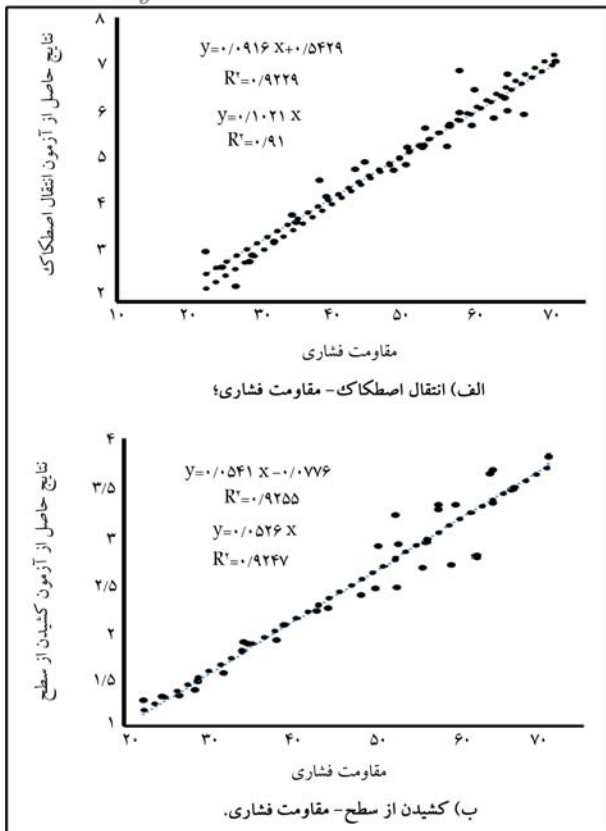


شکل ۷. مقاومت چسبندگی برشی.

۳.۳. مقاومت چسبندگی برشی و کششی

در شکل ۷ نتایج حاصل از آزمون «انتقال اصطکاک» برای تعیین مقاومت چسبندگی برشی ملات‌ها نشان داده شده است. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزودن الیاف، مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون «انتقال اصطکاک» در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۳۲/۹ و ۴۴/۷ درصد افزایش داشته است. همچنین اعمال پیش فشار ۱/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بر ملات الیافی باعث افزایش نه چندان چشمگیر چسبندگی در سنین مختلف شده است. مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای ملات الیافی بدون پیش فشار به ترتیب برابر ۲/۵۸، ۲/۸۶ و ۲/۸۲ مگاپاسکال است در حالی که برای ملات تحت پیش فشار ۱/۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در سنین مذکور به ترتیب برابر ۲/۶۶، ۲/۹۸ و ۲/۹۹ مگاپاسکال است. ملاحظه می‌شود که اعمال ۱/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش چسبندگی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۳/۱، ۴/۳ و ۶ درصد شده است. همچنین اعمال پیش فشار ۵/۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش چسبندگی در سنین مذکور به ترتیب برابر ۵/۲، ۱۴/۶ و ۱۵/۷ درصد است.

دلیل افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین ملات الیافی و بتن بستر تحت پیش‌فشار می‌تواند به دلیل تراکم بیشتر ملات در فشار باشد زیرا یکی از عوامل مهم بر مقدار چسبندگی، میزان فشردگی لایه‌ی تعمیر است. همچنین با اعمال پیش فشار، امکان تماس ذرات تشکیل دهنده ملات با سطح بتن بستر بیشتر شده و همین امر سبب افزایش مقاومت چسبندگی برشی می‌شود. البته در پیش‌فشارهای بالا (۵ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) تأثیر مثبتی روی چسبندگی مشاهده نشد؛ یکی از دلایل این امر خروج دوغاب داخل ملات در هنگام اعمال فشارهای بالا بود که علی‌رغم تلاش برای حفظ دوغاب، این اتفاق رخ داد. در شکل ۸ نتایج حاصل

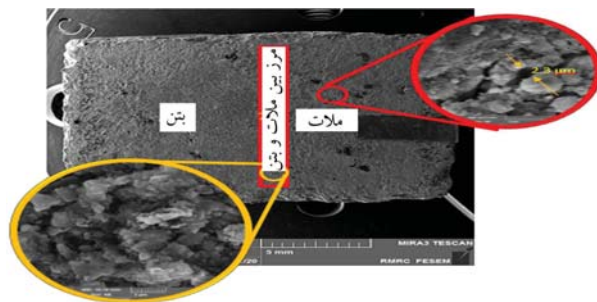


شکل ۱۲. همبستگی بین آزمون های درجا با مقاومت فشاری ملات های مسلح به الیاف (مگاپاسکال).

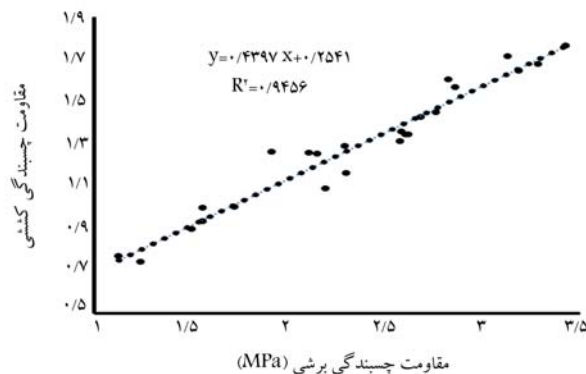
آسانی از نتایج یکی، نتایج معادل دیگری را به دست آورد. همچنین آسیب های وارده از هر دو روش بسیار جزئی است اما برخلاف آزمون «کشیدن از سطح» که مجبور به استفاده از چسب های شیمیایی برای چسباندن استوانه فولادی به ملات هستیم، در آزمون «انتقال اصطکاک» تمامی وسایل به کار گرفته شده به صورت مکانیکی است و لذا در هرگونه شرایط آزمایشگاهی و محیطی کارایی منحصر به فردی دارد و بدون هیچ محدودیت رطوبتی و دمایی قابل استفاده است.

۴.۳. ارزیابی مقاومت فشاری

در این قسمت همبستگی بین قرائت های به دست آمده از انجام آزمون «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» با مقاومت فشاری ملات های مسلح به الیاف ارائه شده است. بدین منظور از تحلیل های آماری رگرسیون استفاده شده است. ابتدا ضریب تعیین و شدت همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» با مقاومت فشاری ملات های الیافی با استفاده از رگرسیون خطی مشخص شده و در ادامه با توجه به فرضیه ی تحقیق، در خصوص این که «نمودار رگرسیون باید از محور مختصات عبور کرده باشد و معادله ی کالیبراسیون آن به صورت $y = ax$ انتخاب شود و سپس تحلیل رگرسیون انجام شود»، در نتیجه ضریب تعیین در این حالت نیز به دست آمده و در آنها اگر اختلافی بین ضرایب تعیین در دو حالت وجود داشته باشد، می توان از تحلیل های رگرسیون به صورت توانی استفاده کرد. در شکل ۱۲ رابطه ی بین مقاومت فشاری، با نتایج حاصل از آزمون های درجا نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپی سطح مشترک ملات و بتن.

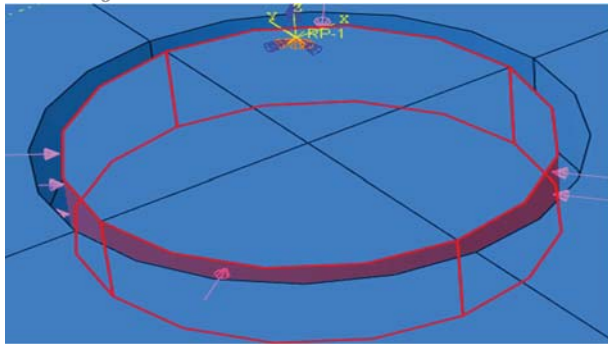


شکل ۱۱. همبستگی نتایج «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» (مگاپاسکال).

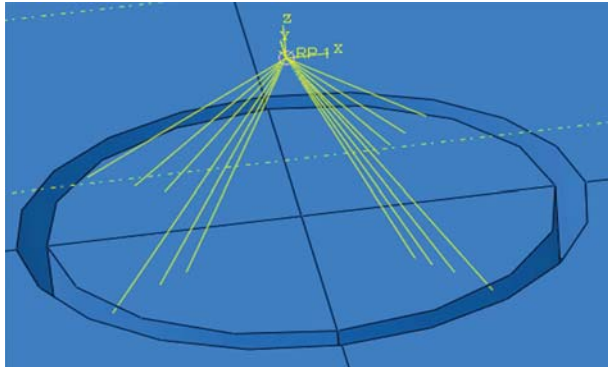
SEM استفاده شد که نتیجه در ادامه ذکر شده است. تصاویر میکروسکوپی مربوط به سطح مشترک ملات و بتن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

برای تهیه ی نمونه برای انجام عکسبرداری SEM از سطح مشترک ملات و بتن، با توجه به نوع دستگاه های عکسبرداری SEM باید سایز نمونه ها کوچک باشد. لذا نمونه ها باید به گونه یی آماده شوند که طریقه آماده سازی آنها باعث ایجاد ترک خوردگی در نمونه نشود، زیرا باعث به دست آمدن نتایج غیرواقعی می شود. لذا از آزه های مینیاتوری که بسیار نازک و حساس اند و مخصوص این کار، استفاده شد (توسط کارشناس مجرب). در شکل ۱۰ نواحی مربوط به بتن، ملات و فصل مشترک بتن - ملات مشخص است. مطابق این شکل حفره های درشت روی سطح ملات و بتن مشاهده می شود که ناشی از تراکم نامناسب، تبخیر آب و جمع شدگی بتن و ملات بوده و وجود آنها می تواند باعث تأثیر منفی روی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت شود. در تصویر بزرگ نمایی شده از ملات، ترک های متعدد و بزرگی در ساختار این ماده قابل مشاهده است. پهنای ترک با استفاده از نرم افزار Image J بررسی و مقدار آن برابر با حدود ۲/۳ میکرومتر به دست آمده است. وجود این ترک های ریز در ساختار ملات می تواند منجر به تمرکز تنش و در نتیجه کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی سیستم شود. همچنین تصویر بزرگ نمایی شده در ناحیه ی فصل مشترک نشانگر خلل و فرج فراوان در این ناحیه است؛ این تخلخل ها و عدم اختلاط مناسب ملات و بتن را می توان به عنوان مهمترین عامل کاهش چسبندگی در این نمونه در نظر گرفت.

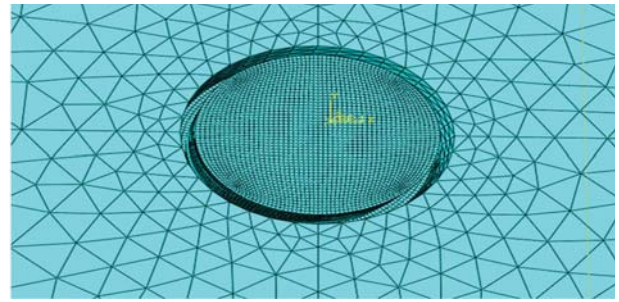
در شکل ۱۱ همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» به نمایش گذاشته شده است. چنان که مشاهده می شود، ضریب تعیین بین مقاومت چسبندگی برشی و کششی به دست آمده از آزمون های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح» برابر ۰/۹۴ است. همچنین شدت ضریب همبستگی برابر ۰/۹۶ به دست آمده است. با توجه به شدت همبستگی بالا بین نتایج حاصل از روش های «کشیدن از سطح» و «انتقال اصطکاک»، می توان به



شکل ۱۴. فشار قطعه فلزی بر مغزه.



شکل ۱۵. مدل سازی اندرکنش بین قطعه فلزی و ملات.



شکل ۱۳. مش بندی نمونه در آزمون «انتقال اصطکاک».

با توجه به شکل ۱۲ الف اختلاف ناچیز بین ضرایب تعیین به دست آمده است، لذا می توان با به کارگیری آزمون «انتقال اصطکاک»، نتایج حاصل از این آزمون را با استفاده از منحنی کالیبراسیون خطی شکل ۱۳ الف با معادله $y = 0/1021x$ و در محدوده ۹۶ درصد، به مقاومت فشاری ملات مسلح به الیاف پلی پروپیلن تبدیل کرد.

با توجه به شکل ۱۲ ب ضریب تعیین و همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون «کشیدن از سطح» و مقاومت فشاری ملات مسلح به الیاف پلی پروپیلن به ترتیب برابر $0/925$ و $0/961$ است. لذا می توان با به کارگیری آزمون «کشیدن از سطح»، نتایج حاصل از این آزمون را با استفاده از منحنی کالیبراسیون خطی شکل ۱۳ ب با معادله $y = 0/0526x$ و در محدوده اطمینان ۹۶ درصد، به مقاومت فشاری ملات مسلح به الیاف پلی پروپیلن تبدیل کرد.

۵.۳. مدل سازی آزمون های درجا

بعد از معرفی مواد و منحنی تنش کرنش در قسمت Module Property و دستور Create Material، یکی از مسائل مهم، مش بندی است که باید همگرایی مش بندی را نیز مورد بررسی قرار داد. برای مدل سازی آزمون های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح»، مش بندی قطعه مکعبی ملات به صورت ترکیبی از دو نوع المان C3D4 و C3D8 انجام شد. بخش اصلی در هر دو مدل سازی که تحت کشش یا فشار قرار می گیرد با المان مکعبی هشت گرهی و با انتگرال کاهش یافته C3D8 المان بندی شد. برای به دست آوردن اندازهی مناسب المان ها در این مدل سازی، ابتدا همگرایی پاسخ ها با المان بندی بین اندازه های $0/5$ ، 1 و 2 میلی متر انجام شد که از بین آنها مش بندی با المان 1 میلی متر انتخاب شد. همچنین بخش های کناری با نوع المان تراهدرال ۴ گرهی پیوسته و با حداقل اندازه المان 1 میلی متر در نواحی متصل به المان های اصلی و بیشینهی اندازه المان 15 میلی متر در کناره ها، المان بندی شدند.

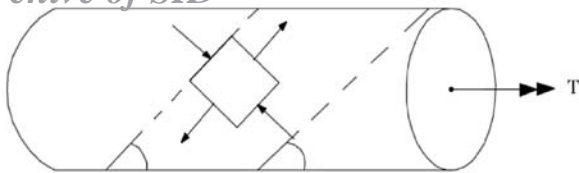
در شکل ۱۳، مش بندی نمونه مکعبی در آزمون «انتقال اصطکاک» قابل مشاهده است. همچنین در آزمون «کشیدن از سطح»، قطعه چسب با اندازه المان 2 میلی متر با نوع المان C3D8 و قطعه فولادی با اندازه المان 2 میلی متر المان بندی شدند. المان ها در راستای محوری برای قطعه فولادی برابر 10 میلی متر در نظر گرفته شد.

چنان که در قسمت های قبلی نشان داده شد، در آزمون «انتقال اصطکاک» یک قطعه فلزی در اطراف مغزه ملات قرار گرفته و سپس توسط پیچ های اطراف، سفت شده و مغزه را در در می گیرد. لذا ابتدا برای بررسی مقدار فشارهای جانبی وارده از طرف قطعه فلزی بر مغزه و تأثیر آن بر نتایج اقدام به اعمال فشاری های جانبی متفاوت بر مغزه شد. مطابق شکل ۱۴ در آیتم Load و با کلیک روی گزینه

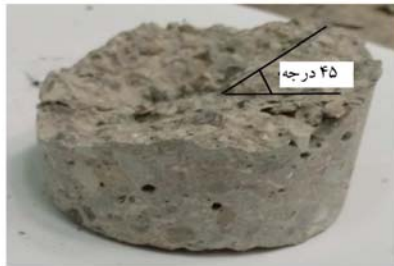
Pressure، اطراف مغزه را انتخاب کرده و با اعمال فشارهای مختلف، اقدام به تحلیل شد.

نتایج حاصله نشان داد که با اعمال فشارهای مختلف، تغییر محسوسی در نتایج به وجود نمی آید. لذا برای مدل سازی اندرکنش میان قطعه فلزی و مغزه در آزمون «انتقال اصطکاک»، مطابق شکل ۱۵، به جای مدل سازی قطعه فلزی، یک گشتاور پیچشی به صورت دوران جابه جایی حول محور مغزه به محیط مغزه به کمک قید اتصال اعمال شد. برای انجام این کار ابتدا با استفاده از آیتم Tools و انتخاب گزینه Reference point یک نقطه مرجع در بالای مغزه ایجاد می کنیم. سپس در قسمت Interaction، قید اتصال را ایجاد کرده و سطوح اطراف مغزه که با قطعه فلزی درگیر است را به عنوان قسمت کنترل شونده انتخاب می کنیم.

برای مقایسهی نتایج حاصل از آزمایشگاه با نتایج به دست آمده از مدل سازی، یک نمونه از ملات که در حالت بدون الیاف دارای مقاومت فشاری $47/6$ مگاپاسکال و در حالت الیافی دارای مقاومت فشاری $50/4$ مگاپاسکال است مدل سازی شد. در حالت آزمایشگاهی، لنگر پیچشی نهایی برای شکست مغزه بدون الیاف در آزمون «انتقال اصطکاک» برابر 109 نیوتن متر به دست آمده است. همچنین لنگر پیچشی نهایی برای شکست مغزه حاوی الیاف برابر 115 نیوتن متر شده است. اولین ترک ها در نمونهی بدون الیاف در گشتاور $27/32$ نیوتن متر و در کناره های نمونه و از گوشه ها که تحت بیشترین گشتاور هستند شروع شده است. اولین ترک ها در نمونهی الیافی نیز از نیروی 38 نیوتن متری شروع شده است. در نمونهی بدون الیاف، گشتاور با افزایش دوران فزونی می یابد تا به مقدار 102 نیوتن متر برسد. در این لحظه ترک ها به یکدیگر رسیده و خرابی اولیه رخ داده است. از این لحظه به بعد سرعت خرابی ها به دلیل کاهش سطح مقطع و کاهش مقاومت مغزه بیشتر می شود و نهایتاً شکست کامل در ملات بدون الیاف و در گشتاور 104 نیوتن متر اتفاق می افتد. اما

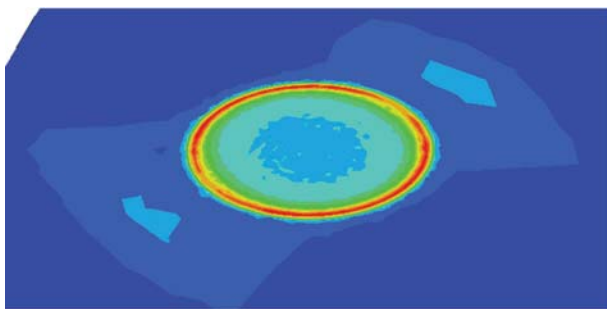


الف) زاویه شکست عمود بر تنش کششی؛



ب) شکست مغزه.

شکل ۱۸. نظریه ی روش «انتقال اصطکاک».



شکل ۱۹. شکست مغزه در آزمون «کشیدن از سطح».

جدول ۶. نتایج عددی و آزمایشگاهی آزمون «انتقال اصطکاک» (نیوتن متر).

نوع ملات	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی	اختلاف نتایج (درصد)
ملات معمولی	۱۰۴	۱۰۹	۴
ملات مسلح به الیاف	۱۱۴	۱۱۵	۱

جدول ۷. نتایج عددی و آزمایشگاهی آزمون «کشیدن از سطح» (نیوتن).

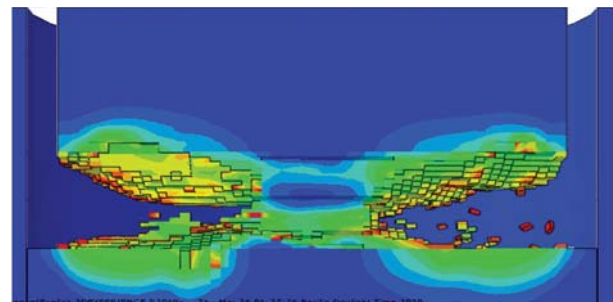
نوع ملات	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی	اختلاف نتایج (درصد)
ملات معمولی	۴۵۵۵	۴۵۰۰	۱
ملات مسلح به الیاف	۴۹۰۵	۴۷۵۰	۳

مقایسه ی کامل نتایج عددی و آزمایشگاهی، نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و آزمون های آزمایشگاهی در جدول ۶ ذکر شده است. در این جدول نتایج حاصل از مدل سازی و اعمال آزمون «انتقال اصطکاک» ثبت شده است.

از جدول ۶ مشاهده می شود که اختلاف بین نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج به دست آمده از اعمال آزمون «انتقال اصطکاک» به صورت آزمایشگاهی کمتر از ۴ درصد است. در جدول ۷ نتایج حاصل از مدل سازی و اعمال آزمون «کشیدن از سطح» نشان داده شده است. چنان که در جدول ۷ مشاهده می شود، اختلاف بین نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج به دست آمده از اعمال آزمون «کشیدن از سطح» به صورت آزمایشگاهی کمتر از ۳ درصد است. داده های جداول ۶ و ۷



شکل ۱۶. لحظه ی شروع ترک خوردگی مغزه در آزمون «انتقال اصطکاک».



شکل ۱۷. شکست مغزه در آزمون «انتقال اصطکاک».

ملات الیافی همچنان در حال تحمل نیرو بوده و سپس با افزایش گشتاور تا مقدار ۱۱۴ نیوتن متر دچار شکست شده است. در شکل ۱۶، لحظه ی شروع ترک های اولیه در ملات نشان داده شده است. از این شکل ملاحظه می شود که اولین ترک ها در گوشه های پایینی مغزه و محل انتهایی اتصال بین مغزه و دستگاه فازی «انتقال اصطکاک» که تحت بیشترین تنش برشی هستند اتفاق افتاده است.

در شکل ۱۷ نیز شکست مغزه در آزمون «انتقال اصطکاک» مشاهده می شود؛ شکست مغزه در آزمون «انتقال اصطکاک» دارای شکست با زاویه ی تقریبی ۴۵ درجه است.

برای مقایسه ی نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی، شکست مغزه در آزمایشگاه نیز در ادامه نشان داده شده است. مغزه های شکسته شده در آزمون «انتقال اصطکاک» به صورت استوانه یی با سطح مقطع دایره یی است. هنگامی که توسط ترکمتر به مغزه، لنگر پیچشی وارد می شود، تنش های برشی بیشینه روی محیط استوانه و در دورترین فاصله از مرکز مغزه به وجود می آید. در شکل ۱۸ الف و با استفاده از قضیه ی دایره ی موهر^۲، نتیجه می شود که تنش های کششی، فشاری و برشی بیشینه، هر سه برابر شعاع دایره موهر است. در این حالت، تنش های اصلی کششی و فشاری با افق زاویه ۴۵ درجه می سازند و با توجه به این که مواد ترد مانند بتن دارای شکست کششی هستند، مطابق شکل ۱۸ ب صفحات شکست، عمود بر راستای تنش های کششی است و شکست مغزه در آزمون «انتقال اصطکاک» شکستی با زاویه ی تقریبی ۴۵ درجه دارد.

نتایج مدل سازی در آزمون «کشیدن از سطح»، در نمونه ملات بدون الیاف نشان می دهد که ترک ها در نیروی ۲۲۴۸ نیوتن ظاهر شدند در حالی که در نمونه ی الیافی، ترک ها در نیروی ۲۷۰۱ نیوتن به وجود آمدند. نیرو به صورت خطی افزایش پیدا کرده و در نمونه ملات بدون الیاف، شکست نهایی در نیروی ۴۵۵۵ نیوتن رخ داده در حالی که برای نمونه الیافی شکست نهایی در نیروی ۴۹۰۵ نیوتن به وجود آمده است. در شکل ۱۹ نمونه یی از لحظه ی شکست در زیر استوانه ی فولادی آزمون «کشیدن از سطح» نشان داده شده است.

برای صحت سنجی نتایج حاصل از مدل سازی با نرم افزار آباکوس و همچنین

-- عکس‌های SEM نشان می‌دهند که فرایند هیدراسیون و تشکیل ژل سیلیکاتی C-S-H در کنار الیاف به خوبی انجام شده و باعث یکنواختی بهتر ترکیب ملات شده است.

-- با به کارگیری آزمون‌های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح»، می‌توان نتایج حاصل از این آزمون‌ها را به ترتیب با استفاده از معادلات $y = 0/1021x$ و $y = 0/0526x$ به مقاومت فشاری ملات‌های مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن تبدیل کرد.

-- نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس نشانگر به تأخیر افتادن شروع ترک‌خوردگی در ملات‌های مسلح به الیاف بوده و باعث بهبود رفتار آنها می‌شود. همچنین همخوانی بالایی بین نتایج عددی با آزمایشگاهی مشاهده شد.

-- با توجه به ضریب همبستگی بالا بین آزمون‌های «انتقال اصطکاک» و «کشیدن از سطح»، می‌توان برای اندازه‌گیری چسبندگی بین ملات و بتن به جای استفاده از دستگاه گران‌قیمت و وارداتی «کشیدن از سطح»، از دستگاه ارزان و داخلی «انتقال اصطکاک» استفاده کرد.

نشان می‌دهد که تفاوت اندکی میان نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌سازی وجود دارد که قابل چشم‌پوشی است.

۴. نتیجه‌گیری

-- اعمال ۱/۰ کیلوگرم برسانتی‌متر مربع پیش‌فشار باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی و کششی ۹۰ روزه بین ملات‌های مسلح به الیاف و بتن به ترتیب برابر ۶ و ۴/۸ درصد شده است.

-- اعمال ۵/۰ کیلوگرم برسانتی‌متر مربع پیش‌فشار باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی و کششی ۹۰ روزه بین ملات‌های مسلح به الیاف و بتن به ترتیب برابر ۱۵/۷ و ۱۳/۳ درصد شده است.

-- افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش ۴۴/۷ و ۴۱/۷ درصدی مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین لایه‌ی تعمیراتی و بستر بتنی و همچنین باعث کاهش ۱۱/۱ درصدی جمع‌شدگی ملات‌ها شده است.

پانویس‌ها

1. scanning electron microscope (SEM)
2. Mohr's circle

منابع (References)

1. Alsadey, S., Salem, M. "Influence of polypropylene fiber on strength of concrete", *American Journal of Engineering Research*, **5**(7), pp. 223-226 (2016).
2. Alam, M., Ahmad, I. and Rehman, F. "Experimental study on properties of glass fiber reinforced concrete", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, **24**(6), pp. 297-301 (2015).
3. ACI Committee 544, Report 544.1R-96, "State-of-the-Art report on fiber reinforced concrete, concr", Int., ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, (2009).
4. Salih, S.A. and AL-Azaawee, M.E. "Effect of polypropylene fibers on properties of mortar containing crushed brick as aggregate", *Journal of engineering and technology*, **26**(12), pp. 1508-1513, (2008).
5. H.A. MesbahU, F. Buyle-Bodin. "Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars", *Construction and Building Materials*, **13**, pp. 439-447 (1999).
6. Sadmomtazi, A. and Fasihi, A. "Influence of polypropylene fibers on the performance of Nano-Sio2-INCORPORATED iranian", *Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering*, **34**(B4), pp. 385-395 (2010).

7. Mohamed, R.A.S. "Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete", *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, **34**, pp. 1049-1059 (2006).
8. Dharan, D.S. and Lai, A. "Study the effect of polypropylene fiber in concrete", *International Research Journal of Engineering and Technology*, **03-06**, pp. 616-619 (2016).
9. Vairagade, V.S., Kene, K.S. and Deshpande, N.V. "Investigation on compressive and tensile behavior of fibrillated polypropylene fibers reinforced concrete", **2-3**, pp. 1111-1115 (2012).
10. Santandrea, M., Imohamed, I.A.O., Jahangir, H. and et al. "An investigation of the debonding mechanism in steel FRP-and FRCM-concrete joints", In 4th Workshop on the New Boundaries of Structural Concrete, pp. 289-298 (2016).
11. Bagheri, M., Chahkandi, A. and Jahangir, H. "Seismic reliability analysis of RC frames rehabilitated by glass fiber-reinforced polymers", *International Journal of Civil Engineering*, **17**(11), pp.1785-1797 (2019).
12. Jahangir, H. and Esfahani, M.R. "Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour", *Steel and Composite Structures*, **34**(6), pp. 877-889 (2020).
13. Ghafari, E. and Naderi, M. "Effect of different curing regime and cementitious materials on the bond strength of self compacting mortars", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **5**(12), pp. 421-428, ISSN 1991-8178 (2011).
14. Naderi, M. and Ghodousian, O. "Adhesion of self-compacting overlays applied to different concrete substrates and Its prediction by Fuzzy Logic", *The*

15. Naderi, M. "Adhesion of different concrete repair systems exposed to different environments", *The Journal of Adhesion*, **84**, pp. 78-104, (2008).
16. Maryoto, A. "The Effect of compaction method on compressive strength of self compacting concrete in laboratory", *1st International Conference on Material Science and Engineering for Sustainable Rural Development, AIP Conf. Proc.* 2094, 020002-1-020002-7, (2019).
17. Tuncan, M., Arioz, O., Ramyar, K. "Effect of of compaction on assessed concrete strength", pp. 847-853 (2014).
18. Junior, R.A., Lima, M.G., and Oliveira, A. "Influence of different compacting method on concrete compressive strength", *Journal of Materials, Rio de Janeiro*, **23**(3), pp.21-28 (2018).
19. ASTM C808/C805M-18. "Standard test method for rebound number of hardened concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).
20. ASTM C597-16. "Standard test method for pulse velocity through concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
21. ACI Committee 214, Report 214.4R-03. "Guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results", American Concrete Institute. (2003).
22. ASTM C900-15. "Standard test method for pullout strength of hardened concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA. (2015).
23. Masi, A., Digrisolo, A., Santarsieo, G. and et al. "Experimental evaluation of drilling damage on the strength of cores extracted from RC buildings", in *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, **7**(7). p. 749, (2013).
24. Naderi, M. "Friction-transfer test for the assessment of in-situ Strength & Adhesion of Cementitious Materials", *Construction & Building Materials*, **19**(6), pp. 454-459 (2005).
25. Naderi M. "New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete", *Journal of Testing and Evaluation*, **35**(6). ISSN: 0090-3973, pp.146-155 (2007).
26. ASTM C1583, "Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method)", West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2004).
27. ASTM C136, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2006).
28. ASTM C127, "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate", West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2012).
29. ASTM C128, "Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate", West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2015).
30. Building and Housing Research Center, "The national meethod for concrete mix design", BHRC Publication, No.S-479. (2008).
31. C. ASTM C157, "Test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete", West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2008).
32. ASTM C490, "Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete", West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2011).
33. ASTM C109, "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)", American Society for Testing and Materials (2013).
34. ASTM C348-19. "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2019).
35. Courard, L. "Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products", University of Liège, Belgium, (1998).