

Analyzing the Effect of Polypropylene Fibers on Compressive Behavior, Shrinkage and Bond Strength of Repair Mortars/Concrete Substrate

Ali Saberi Varzaneh^{1*}, Mahmood Naderi²

1- Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2 -Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

The dry shrinkage of mortars is one of the primary causes for the reduction of bond strength between repair mortars and concrete substrates. Utilizing fibers in the mortars is one of the methods used to reduce shrinkage. The current study used polypropylene fibers in mortars to improve the bond between repair mortar and concrete substrate, and also to control the dry shrinkage of mortars. The "friction-transfer" and "pull-off" methods were used to determine the bond strength between the repair mortar and concrete substrate. In addition to determining the amount of shrinkage and bond strength, the amount of compressive strength of fiber reinforced mortar by using the above methods and by modeling finite element with ABAQUS software has been investigated. In addition, the methods of initiation and distribution of cracks and stresses were shown. In order to assess the in-situ compressive strength of polypropylene fiber-reinforced mortars, the correlation of records obtained from semi-destructive methods of "friction-transfer" and "pull-off" with those of laboratory tests was determined, using the linear and exponential regression analyses. Then, using calibration curves, the equations required to convert the results of in situ methods to the compressive strength of polypropylene fiber-reinforced mortars were presented. The results demonstrate the positive effect of fibers on shrinkage, shear and tensile bond strength and compressive strength of mortars. The correlation coefficients of the "friction-transfer" and "pull-off" methods are indicative of a strong linear relationship between the two methods that instead of using an expensive "pull-off" device, a simple and inexpensive "friction-transfer" device can be used.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 August 2020

Revise Date: 25 September 2020

Accept Date: 27 September 2020

Keywords:

Fiber

Bond Strength

Shrinkage

In-situ Methods

Finite Element Method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.246151.2224>

*Corresponding author: Ali Saberi Varzaneh

Email address: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر جمع شدگی، رفتار فشاری و مقاومت چسبندگی

برشی و کششی ملات های تعمیراتی بر بستر بتنی

علی صابری ورزنده^{۱*}، محمود نادری^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استاد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

پدیده خشک شدن ملات و به دنبال آن به وجود آمدن جمع شدگی از دلایل اصلی در کاهش مقاومت چسبندگی بین ملات های تعمیراتی و بستر بتنی می باشد. یکی از راه کارهای کاهش جمع شدگی، استفاده از الیاف داخل ملات می باشد. لذا در این مقاله جهت بهبود چسبندگی بین ملات تعمیراتی و بستر بتنی از الیاف پلی پروپیلن در مخلوط ملات استفاده گردیده و بدین منظور مقدار جمع شدگی حاصل از خشک شدن ملات ها کنترل گردیده است. برای تعیین مقدار مقاومت چسبندگی بین ملات تعمیراتی و بستر بتنی از روش های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" استفاده شده است. همچنین علاوه بر تعیین مقدار جمع شدگی و مقاومت چسبندگی، مقدار مقاومت فشاری ملات های حاوی الیاف با به کارگیری روش های فوق و با مدل سازی اجزا محدود با نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته و نحوه شروع و توزیع ترک ها و تنش ها نشان داده شده است. برای ارزیابی مقاومت فشاری درجای ملات های مسلح به الیاف پلی پروپیلن، با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی و توانی، همبستگی بین قرائت های به دست آمده از روش های نیمه مخرب "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" با آزمون های آزمایشگاهی تعیین گردید. سپس با استفاده از نمودارهای کالیبراسیون، معادلات مورد نیاز جهت تبدیل نتایج آزمون های درجا به مقاومت فشاری ملات های مسلح به الیاف پلی پروپیلن ارائه شدند. نتایج به دست آمده نشان دهنده تاثیر مثبت الیاف بر جمع شدگی، مقاومت چسبندگی برشی و کششی و مقاومت فشاری ملات ها می باشد. همچنین شدت همبستگی به دست آمده از روش های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" بیانگر رابطه قوی خطی بین این دو روش می باشد که در نتیجه می توان به جای استفاده از دستگاه گران قیمت Pull-off از دستگاه ساده و ارزان "انتقال اصطکاک" استفاده نمود.

کلمات کلیدی: الیاف، مقاومت چسبندگی، جمع شدگی، روش های درجا، روش اجزا محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.246151.2224	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2020.246151.2224	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۶	۱۳۹۹/۰۷/۰۶	۱۳۹۹/۰۷/۰۴	۱۳۹۹/۰۶/۱۰
علی صابری ورزنده ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

خمیر هیدراته شده اشباع از نظر تغییر ابعاد پایدار نیست. تا زمانی که خمیر در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد نگهداری شود عملاً هیچگونه تغییری در ابعاد آن رخ نمی دهد. اما به محض قرار گرفتن در محیطی غیر اشباع، به علت آن که $C-S-H$ مقداری از آب جذب شده ی خود را از دست می دهد، لذا تغییر شکل ناشی از جمع شدن پیدا می کند. جمع شدگی باعث بوجود آمدن ترک در ملات شده که این ترک ها علاوه بر آثار نامطلوب بر ظاهر ملات، سبب کاهش دوام و مقاومت آن شده و همچنین تاثیر منفی بر چسبندگی بین ملات و بستر بتنی می گذارند. یکی از موثرترین عوامل برای جلوگیری از ترک خوردگی، پایین نگهداشتن روند تبخیر آب از سطح بتن می باشد که این کار با استفاده از عمل آوری های مناسب قابل انجام می باشد. البته جمع شدگی ملات، در مدت زمان طولانی ادامه پیدا می کند و با توجه به اینکه در اکثر موارد در کارهای عملی، عمل آوری حداکثر به مدت ۷ تا ۱۰ روز ادامه پیدا می کند لذا بعد از آن نیز، جمع شدگی ملات های تعمیری رخ داده و لذا دوباره سبب کاهش مقاومت چسبندگی بین ملات و بستر بتنی می گردد. برای حفظ مقاومت چسبندگی بین لایه تعمیری و بستر بعد از عمل آوری، می بایست با راهکارهایی، مقدار جمع شدگی و ترک های ناشی از آن را تا حد امکان کاهش داد. الیاف در داخل ملات می تواند به عنوان راهکاری برای افزایش دوام، مقاومت و کاهش حداکثری ترک های ناشی از جمع شدگی استفاده گردد.

با توجه به گزارشات برخی محققین، شکست های به وجود آمده در سیستم های چند لایه بتنی، اغلب به دلیل عدم وجود سازگاری کافی بین بتن بستر و مشخصه های لایه های تعمیری می باشد [۱]. شکست رخ داده بین سطوح مشترک، عمدتاً ناشی از تفاوت جمع شدگی بین آن ها می باشد [۲]. تفاوت در میزان جمع شدگی به وجود آمده بین بتن قدیم و لایه تعمیری، عامل مهمی در کاهش چسبندگی بین این دو سیستم می باشد [۳]. خشک شدگی زود هنگام، باعث ایجاد جمع شدگی و ترک های ریز می گردد [۴]. تحقیقات فراوانی در خصوص تاثیر الیاف روی بتن و ملات انجام پذیرفته است. مقدار حجم الیاف به کار برده شده، می تواند تاثیر مثبت یا منفی روی مشخصات مصالح سیمانی بگذارد. در تحقیقی روی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر جمع شدگی ملات های سیمانی مشخص گردید که استفاده از الیاف داخل ملات، باعث کاهش جمع شدگی حاصل از خشک شدگی می گردد [۵]. الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن و کاهش فضاهای خالی داخل مخلوط می گردد [۶]. در یک تحقیق روی تاثیر مقدار الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن مشخص گردید که افزایش بیش از ۰/۵ درصدی حجم الیاف باعث تاثیر منفی شده و مقدار بهینه الیاف برابر ۰/۲۵ درصد به دست آمد [۷]. همچنین در تحقیقی دیگر نتایج آزمایشات نشان داد که افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف باعث بهبود رفتار بتن می گردد [۸]. در کل افزایش بیش از حد مقدار الیاف، باعث تاثیر منفی روی مشخصات مصالح سیمانی می گردد [۹]. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در گذشته و همچنین با استفاده از کتاب طرح مخلوط ملی بتن [۱۰] که مقدار مصرف بهینه الیاف در مصالح سیمانی را برابر ۰/۳ درصد ذکر نموده است لذا در این مقاله از همین مقدار الیاف برای مسلح نمودن ملات ها استفاده شده است.

همچنین مصالح کامپوزیتی جدید و غیر معدنی در سال های اخیر جهت بهبود رفتار و چسبندگی ملات و بتن مورد استفاده قرار گرفته است. پلیمر تقویت شده با الیاف^۱ و ماتریس سیمانی مسلح به الیاف^۲ به دلیل برخی از مزایایی که در مقایسه با مصالح سنتی ارائه می دهند، موفقیت های زیادی در مقاوم سازی و ترمیم سازه ها کسب نموده اند. استفاده ی آسان و نسبت مقاومت به وزن بالا، برخی از عوامل اصلی موفقیت این فناوری های جدید است [۱۱]. یک نوع دیگر از این مصالح، پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه می باشد که به عنوان مثال می توان از آن ها برای مقاوم سازی ستون های سازه های بتن مسلح استفاده نمود [۱۲]. گروت مسلح به فولاد از مصالح تعمیری جدید دیگری می باشد که باعث بهبود چسبندگی با سطح بستر بتنی می گردد [۱۳]. در تحقیقی روی مقاومت چسبندگی بین بتن معمولی و ملات های سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت خیلی بالا، مشاهده گردید که این نوع ملات ها نسبت به بتن معمولی دارای چسبندگی بهتری به بتن بستر می باشند و استفاده از آن ها می تواند باعث افزایش مقاومت چسبندگی گردد [۱۴]. استفاده از الیاف کربن و پلی پارافین نیز برای افزایش چسبندگی بین ملات و بتن مفید می باشد. در تحقیقی که روی مشخصات سطح مشترک ملات های مسلح به الیاف کربن و پلی پارافین انجام شد مشخص گردید که مقاومت چسبندگی بین بتن و ملات های مسلح به الیاف پلی پارافین حدود ۷

¹ Fiber-reinforced polymer² Fiber-reinforced cementitious matrix

درصد بیشتر از ملات های مسلح به الیاف کرین می باشد. همچنین مقاومت چسبندگی ۸۴ روزه حدود ۵۴ درصد بیشتر از مقاومت چسبندگی ۷ روزه به دست آمده است [۱۵]. الیاف فولادی نیز می تواند با اضافه شدن به لایه تعمیر، تاثیر مثبت بر چسبندگی سطح مشترک بستر و لایه تعمیر بگذارد. در تحقیقی روی چسبندگی بین بتن معمولی و لایه تعمیر حاوی الیاف فولادی و سیلیکافوم مشخص گردید که مقاومت چسبندگی این نوع لایه تعمیر به بتن بستر بسیار بالا می باشد و همچنین با گذشت زمان افزایش می یابد [۱۶]. در این تحقیق با استفاده از آزمون نوین "انتقال اصطکاک" اقدام به اندازه گیری مقاومت چسبندگی برشی بین ملات مسلح به الیاف پلی پروپیلن و بتن بستر شده است. همچنین رابطه همبستگی بین نتایج حاصل از این آزمون با نتایج به دست آمده از آزمون "کشیدن از سطح" تعیین گردیده است که نشان می دهد می توان به جای استفاده از دستگاه گران قیمت آزمون "کشیدن از سطح" از دستگاه های ارزان، داخلی و در دسترس آزمون "انتقال اصطکاک" جهت تعیین چسبندگی بین لایه تعمیر و بستر بتنی استفاده نمود. تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت چسبندگی هم از لحاظ فیزیکی (کاهش جمع شدگی و در نتیجه عرض ترک ها) و هم از لحاظ شیمیایی (تاثیر مثبت بر فرآیند هیدراسیون سیمان) با استفاده از عکسبرداری SEM^۳ و XRD^۴ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات های مسلح به الیاف پلی پروپیلن به صورت درجا و در زمان های متفاوت، از آزمون های فوق بهره گرفته شده است و ضریب همبستگی بین آزمون های آزمایشگاهی و آزمون های درجا تعیین گردیده است. در انتها نیز معادلات تبدیل نتایج آزمون های درجا فوق به مقاومت فشاری ملات های مسلح به الیاف ارائه گردیده است. در ادامه روش های مختلف تعیین چسبندگی ارائه شده است.

از آزمون های تعیین چسبندگی می توان به آزمون دو نیم شدن، تیر مرکب، صفحه برشی دابل، تست خمش و آزمون برش مایل اشاره نمود. البته نادری در سال ۲۰۱۲ [۱۷] به صورت عملی و تئوری، نتایج به دست آمده از آزمون برش مایل را غیر قابل اعتماد دانسته است. آزمون دیگری که به صورت درجا نیز کاربرد دارد، آزمون "کشیدن از سطح" [۱۸] می باشد. در این آزمون، مقاومت کششی چسبندگی بین لایه تعمیر و بستر قابل ارزیابی می باشد. از آزمون های درجا دیگر جهت ارزیابی مقاومت برشی چسبندگی بین ملات تعمیر و بستر بتنی می توان از آزمون "انتقال اصطکاک" [۱۹] نام برد. در تحقیقات گذشته، موارد متعددی از آزمون "انتقال اصطکاک" برای ارزیابی مقاومت بتن [۲۰-۲۱]، صخره سنگ [۲۲]، رویه آسفالتی [۲۳] و چسبندگی ملات به بستر بتنی [۲۴-۲۵] استفاده شده است. در این تحقیق با به کارگیری روش های "کشیدن از سطح" و "انتقال اصطکاک" مقدار مقاومت چسبندگی کششی و برشی بین ملات تعمیر و بدون الیاف با بستر بتنی اندازه گیری شده و تاثیر الیاف بر جمع شدگی و مقدار چسبندگی بررسی گردیده است. همچنین مقاومت فشاری ملات های تعمیر با به کارگیری روش های فوق به صورت آزمایشگاهی و عددی، ارزیابی و نتایج ارائه گردیده است.

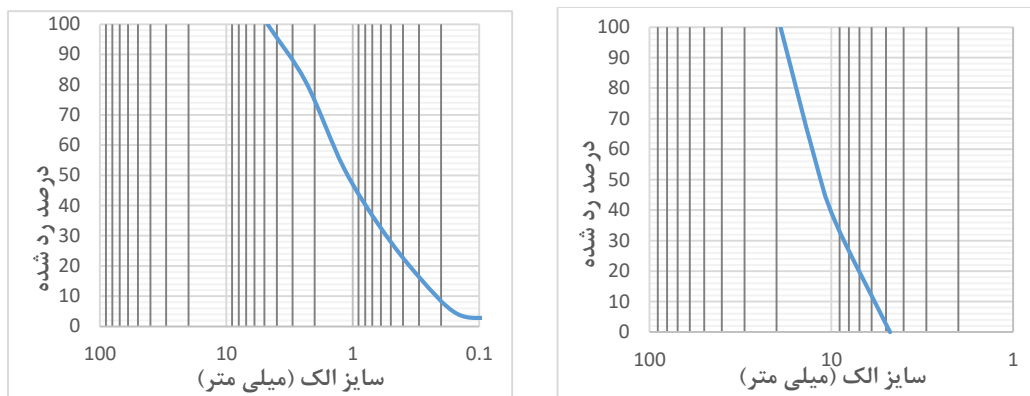
۲- کارهای آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

از سیمان تیپ ۲ با چگالی ۳۰۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب جهت ساخت ملات و بتن بستر استفاده شد. دانه بندی سنگدانه ها مطابق با استاندارد ASTM C136 [۲۶] صورت پذیرفت. حداکثر اندازه شن و ماسه به ترتیب برابر ۱۹ و ۴/۷۵ میلی متر می باشد. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقدار جذب آب آن ها طبق استانداردهای ASTM C128 [۲۷] و ASTM C127 [۲۸] برابر ۲/۶ و ۳/۲ درصد به دست آمد. نمودار دانه بندی شن و ماسه در شکل ۱ قابل مشاهده است.

دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳

پراش اشعه ایکس^۴



ب) ریزدانه

الف) درشت دانه

شکل ۱: نمودار دانه بندی سنگدانه ها

با توجه به اطلاعات ارائه شده از شرکت سازنده، مشخصات الیاف به کار رفته جهت مسلح نمودن ملات ها در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین در این جدول الزامات الیاف پلی پروپیلن بر اساس استاندارد ACI 544.1R [۲۹] نیز ارائه گردیده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش مقدمه، الیاف پلی پروپیلن به مقدار ۰/۳ درصد حجم ملات به مخلوط اضافه شد.

جدول ۱: مشخصات الیاف

مشخصات	قطر (mm)	طول (mm)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (Kg/Litr)
شرکت سازنده	۰/۰۲۲	۱۲	۷	۳۸۰	۰/۹۱
ACI 544.1R	-	-	۳/۵-۸/۴	۱۳۸-۶۹۰	۰/۹-۰/۹۱

مواد عمل آورنده استفاده شده از نوع پلی اولفین و چسب دو جزئی نیز از نوع رزین های اپوکسی با ترکیب حجمی یک به یک، دارای مقاومت برشی ۱۵ MPa، مقاومت فشاری ۷۰ MPa و مدول الاستیسیته ۱۲۷۵۰ MPa می باشد. ملات های تعمیراتی به کار گرفته شده در این تحقیق دارای دو نسبت متفاوت سیمان به ماسه می باشند که در جدول ۲ قابل مشاهده است. همچنین نمونه های مکعبی ۱۵۰ میلی متری برای ساخت بتن بستر استفاده شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها برابر ۵۷ MPa به دست آمد. فوق روان کننده به کار گرفته شده در ساخت بتن بستر از نوع پلی کریکسیلات می باشد. طرح اختلاط بتن بستر در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات ملات های ساخته شده

نام مختصر	نسبت ماسه به سیمان	آب / سیمان
M1	۱ : ۳	۰/۵
M2	۱ : ۲	۰/۵

جدول ۳: نسبت های وزنی بتن بستر (کیلوگرم بر متر مکعب)

فوق روان کننده	آب به سیمان	آب	ماسه	شن	سیمان
۲/۶۱	۰/۳۵	۱۸۷	۸۳۵	۶۶۴	۵۳۴

۲-۲- ساخت نمونه ها

ابتدا بتن بستر به صورت نمونه های مکعبی ۱۵۰ میلی متری ساخته و به مدت دو ماه در آب قرار گرفتند. سپس جهت دستیابی به سطحی صاف و با مقاومت کافی، با استفاده از اره بتن بر، نمونه ها به سه قسمت با ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ در ۵۰ میلی متر تقسیم شدند.

قبل از اینکه ملات تعمیری روی بستر بتنی اعمال گردد، سطح بستر به طور کامل اشباع گردید و بدون وجود قطرات آب در سطح بتن، دوغاب آب سیمان نسبتاً سفت روی سطح بستر اعمال گردید. قبل از خشک شدن دوغاب، ملات های تعمیری بر بستر بتنی اعمال شده و در عمل آوری های مختلف قرار گرفتند. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۷ روز تحت عمل آوری های "غرقاب داخل آب" و "مواد عمل آمونده" قرار گرفتند. سپس در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه، آزمایشات مورد نیاز بر روی آن ها صورت پذیرفت. همچنین هم زمان، نمونه های مورد نیاز جهت تعیین جمع شدگی و مقاومت فشاری ملات ها نیز تهیه و در عمل آوری قرار گرفتند.

۲-۳- روش ها آزمایشگاهی

از روش "انتقال اصطکاک" برای اندازه گیری مقاومت برشی چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی و همچنین ارزیابی مقاومت فشاری ملات های تعمیری استفاده می شود. برای اندازه گیری چسبندگی، ابتدا با استفاده از دستگاه کرگیری، یک مغزه جزئی از سطح ملات تا داخل بستر بتنی ایجاد می نماییم (شکل ۲-الف). نفوذ مغزه کرگیری شده تا داخل بستر بتنی به این دلیل می باشد که احتمال شکست مغزه در مرز بین ملات تعمیری و بستر بتنی را فراهم نموده تا بتوان مقاومت لایه تعمیری و بستر بتنی را با مقاومت چسبندگی لایه تعمیری مورد ارزیابی قرار داد. در این حالت، لایه تعمیری و بستر بتنی و مرز بین آن ها به طور هم زمان تحت تنش قرار گرفته و شکست در سطح ضعیف تر اتفاق می افتد. سپس مطابق شکل ۲-ب دستگاه فلزی "انتقال اصطکاک" روی مغزه تثبیت شده و با به کارگیری یک ترکمر معمولی، لنگر پیچشی وارد می گردد تا مغزه دچار شکست گردد (شکل ۲-ج).



ج) اعمال لنگر پیچشی



ب) تثبیت دستگاه



الف) ایجاد مغزه

شکل ۲: تعیین مقاومت چسبندگی برشی

همچنین برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات تعمیری، ابتدا مانند حالت قبل یک مغزه جزئی به ارتفاع ۲۵ میلی متر روی ملات ایجاد نموده و مطابق شکل ۳-الف دستگاه "انتقال اصطکاک" را روی آن قرار داده و با ترکمر، لنگر پیچشی وارد می گردد. در شکل ۳-ب یک نمونه از مغزه شکسته شده پس از انجام آزمون قابل مشاهده می باشد.



ب) مغزه شکسته شده بعد از انجام آزمون



الف) اعمال لنگر پیچشی با ترک‌متر

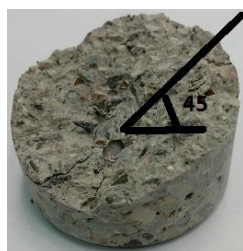
شکل ۳: ارزیابی مقاومت فشاری با آزمون "انتقال اصطکاک"

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که مغزه بتنی در روش "انتقال اصطکاک" به صورت یک استوانه با سطح مقطع دایره می‌باشد. لذا مطابق شکل ۴- الف در اثر اعمال لنگر پیچشی به مغزه، تنش‌های برشی به صورت عمود بر شعاع دایره ظاهر می‌شوند و بیشترین تنش برشی روی محیط دایره که بیشترین فاصله از مرکز را دارد رخ می‌دهد. در این حالت مقدار حداکثر تنش برشی ایجاد شده تحت اثر پیچش عبارت است از (رابطه ۱):

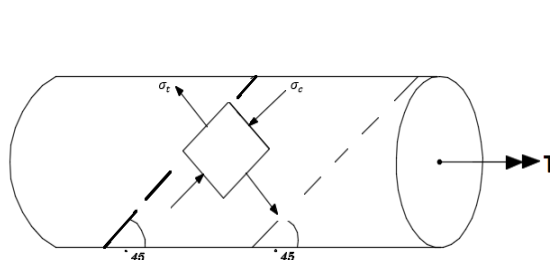
$$\tau_{E-\max} = \frac{Tr}{J}, J = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau_{E-\max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن r برابر شعاع مغزه جزیی به میلی‌متر و J ممان اینرسی قطبی می‌باشد.

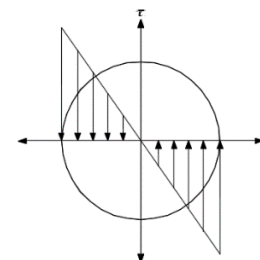
با استفاده از دایره موهر، نتیجه می‌شود که تنش‌های برشی، کششی و فشاری حداکثر، هر سه مقداری برابر شعاع دایره موهر دارند. همچنین تنش‌های اصلی فشاری و کششی، با افق زاویه ۴۵ درجه می‌سازند. مواد ترد مانند بتن دارای شکست کششی می‌باشد. همانند شکل ۴- ب صفحات شکست در این حالت، عمود بر راستای تنش کششی ظاهر می‌شوند. در شکل ۴- ج نیز ملاحظه می‌شود که شکست مغزه استوانه‌ای در آزمون "انتقال اصطکاک" دارای زاویه تقریباً ۴۵ درجه با افق می‌باشد.



ج) شکست مغزه



ب) زاویه شکست



الف) تنش برشی حداکثر

شکل ۴: تئوری روش "انتقال اصطکاک"

همچنین مطابق شکل ۵ از آزمون "کشیدن از سطح" برای تعیین مقاومت چسبندگی کششی و ارزیابی مقاومت ملات‌ها استفاده

شد.



(ب) ارزیابی مقاومت فشاری



(الف) تعیین مقاومت چسبندگی کششی

شکل ۵: آزمون "کشیدن از سطح"

برای تعیین جمع‌شدگی نمونه‌ها نیز از استانداردهای ASTM C157 [۳۰] و ASTM C490 [۳۱] استفاده شده است. مطابق با استاندارد، می‌بایست برای هر نمونه حداقل ۳ آزمون ساخته شود. برای اندازه‌گیری مقدار جمع‌شدگی بر حسب درصد از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، L تغییر طول نمونه، L_i قرائت اولیه نمونه منهای قرائت میله مرجع، L_x قرائت نمونه منهای قرائت میله مرجع و G برابر طول میله مرجع است. برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی ملات‌ها می‌بایست از قالب‌های منشوری با ارتفاع ۲۸۵ میلی‌متر و مقطع مربعی ۲۵ میلی‌متری که دارای طول اندازه‌گیر ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشند استفاده نمود. مقایسه‌کننده طول، جهت اندازه‌گیری تغییر طول نمونه‌ها باید به شکلی طراحی شده باشد که نمونه بتواند داخل آن جای بگیرد و تماس کامل با گلمیخ‌های آزمون داشته باشد. در شکل ۶ تجهیزات و نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش تعیین جمع‌شدگی قابل مشاهده است.



(ج) مقایسه‌کننده طول



(ب) قالب تعیین جمع‌شدگی



(الف) نمونه منشوری و میله استاندارد

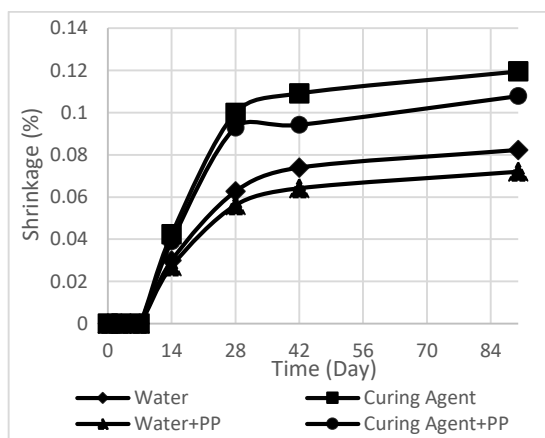
شکل ۶: آزمایش جمع‌شدگی

برای تعیین مقدار جمع‌شدگی، نمونه‌ها مدت زمان هفت روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند و سپس در فضای آزاد رها شدند. جمع‌شدگی نمونه‌ها در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه با دستگاه کمپراتور (با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر) تعیین گردید. مقاومت فشاری ملات‌ها نیز با استفاده از استاندارد ASTM C109 [۳۲] انجام پذیرفت. برای مقاومت فشاری، متوسط ۶ نمونه مکعبی ۵۰ میلی‌متری اندازه‌گیری شد.

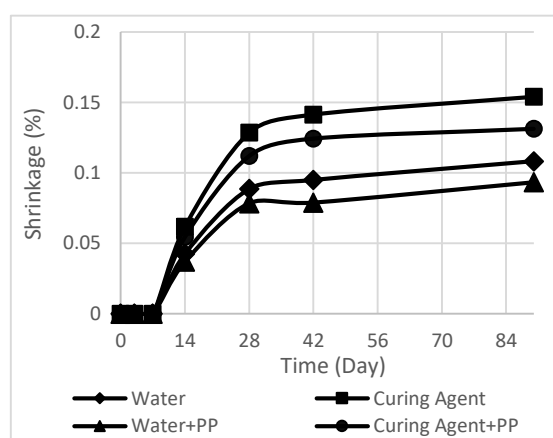
۳- نتایج و تحلیل آن ها

۳-۱- جمع شدگی حاصل از خشک شدن

در شکل ۷ نتایج حاصل از جمع شدگی ملات های تعمیری نشان داده شده است. از شکل ۷- الف مشاهده می شود مقدار جمع شدگی ۹۰ روزه برای ملات M1 (۰/۵ - ۳ - ۱)، بدون الیاف و تحت عمل آوری داخل آب و مواد عمل آورنده به ترتیب برابر ۰/۰۸۲۲ و ۰/۱۱۹۵ درصد می باشد. برای همین ملات با افزودن الیاف، مقدار جمع شدگی ۹۰ روزه در عمل آوری های ذکر شده برابر ۰/۰۷۲۰ و ۰/۱۰۷۹ درصد شده است. به عبارتی افزودن الیاف به ملات M1، میزان جمع شدگی ۹۰ روزه را به طور متوسط به مقدار ۱۱/۱ درصد کاهش داده است. مطابق با شکل ۷- ب مقدار کاهش جمع شدگی ۹۰ روزه برای ملات M2 (۰/۵ - ۲ - ۱) با افزودن الیاف به طور متوسط برابر ۱۴/۳ درصد شده است. از مقایسه مقادیر جمع شدگی دو نوع ملات ذکر شده، مشاهده می شود که مقدار جمع شدگی ملات M1 از ملات M2 کمتر می باشد. علت این موضوع به دلیل وجود سنگدانه بیشتر در ملات M1 می باشد زیرا استفاده از سنگدانه بیشتر باعث کاهش مصرف مقدار سیمان شده و همین امر سبب کاهش جمع شدگی ملات می گردد.



الف) ۳-۰/۵



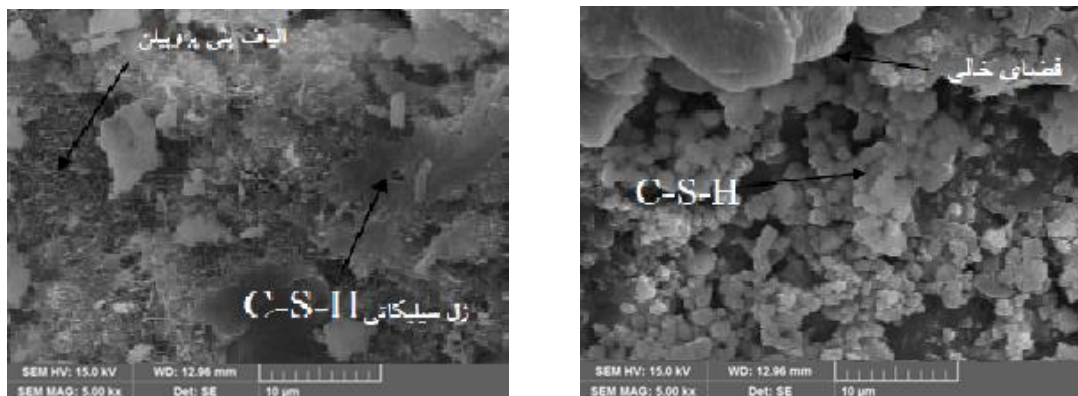
ب) ۲-۰/۵

شکل ۷: نمودار جمع شدگی ملات ها

الیاف علاوه بر اینکه به صورت فیزیکی تاثیر مستقیم بر بهبود رفتار مکانیکی ملات ها دارد، همچنین به طور غیر مستقیم نیز تاثیر شیمیایی در پیشرفت فرآیند هیدراسیون سیمان می گذارد. برای حالت فیزیکی، هدف از اضافه نمودن الیاف به ملات، افزایش مقاومت کششی، انتقال تنش در عرض مقطع ترک و جلوگیری از توسعه ترک ها می باشد. زمانی می توان از به وجود آمدن ترک خوردگی در داخل ملات اجتناب ورزید که تنش ایجاد شده در اثر تغییر شکل نسبی ناشی از جمع شدگی، کوچکتر از مقاومت کششی ملات باشد. الیاف با عبور از عرض ترک ها، آن ها را به هم دوخته و مانع از افزایش عرض ترک شده و همین امر باعث کاهش مقدار جمع شدگی بر اثر خشک شدگی می گردد. اما برای تاثیر غیر مستقیم الیاف پلی پروپیلن بر مشخصات شیمیایی ملات ها، و جهت بررسی تاثیر الیاف بر ساختار میکروسکوپی ملات، از عکسبرداری و آنالیز توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ (SEM) استفاده شد. در شکل ۸- الف، عکس SEM گرفته شده از ملات بدون الیاف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد ژل سیلیکاتی C-S-H از هیدراته شدن C3S و C2S تشکیل شده است اما یکسری فضاهای خالی در ملات مشاهده می گردد که می تواند تاثیر بسزایی در کاهش مقاومت ملات بگذارد. مطابق شکل ۸- ب با افزودن الیاف پلی پروپیلن به ملات، عکس های SEM نشان می دهند که فرایند هیدراسیون سیمان و تشکیل ژل سیلیکاتی C-S-H در کنار الیاف پلی پروپیلن به خوبی انجام شده و باعث یکنواختی بهتر ترکیب ملات گردیده است. به عبارتی افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث پیوستگی بهتر ملات گردیده است. همین تاثیر الیاف بر بهبود روند فرآیند هیدراسیون باعث کاهش مقدار

⁵ Scanning Electron Microscope

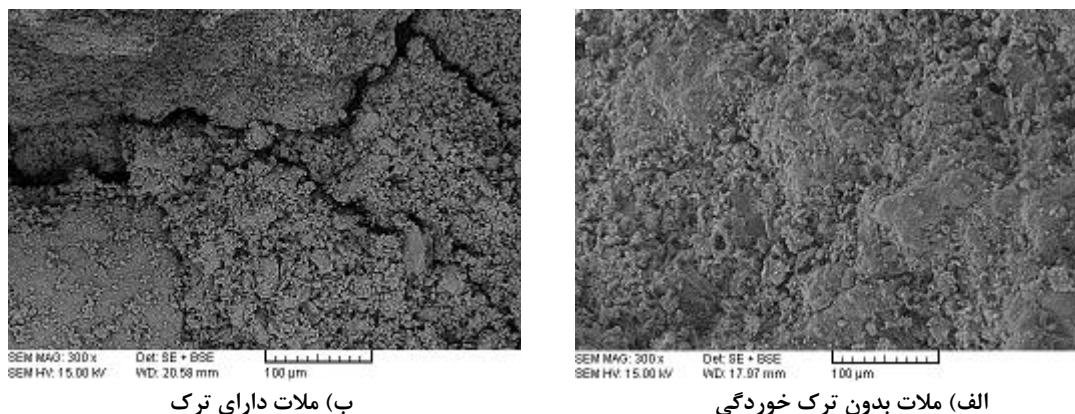
جمع شدگی سیمان داخل ملات گردیده و لذا جمع شدگی ملات های مسلح به الیاف پلی پروپیلن کمتر از جمع شدگی ملات های معمولی بدون الیاف می باشد.



شکل ۸: بررسی پیشرفت فرآیند هیدراسیون توسط عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی
 الف) ملات بدون الیاف ب) ملات مسلح به الیاف

با مقایسه جمع شدگی ملات ها در عمل آوری های مختلف مشاهده می شود که جمع شدگی ملات های عمل آوری شده در آب به طور میانگین ۳۱ درصد کمتر می باشد. با توجه به اینکه سیمان هیدراته شده، حاوی منافذ موئینه می باشد لذا داخل این منافذ، آب وجود دارد. البته از دست رفتن آب داخل منافذ باعث جمع شدگی نمی شود اما به محض اینکه آب منافذ موئینه از دست می رود، باعث از بین رفتن آبی که جذب سطحی شده، می گردد و جمع شدگی حاصل می شود. با توجه به اینکه مواد عمل آورنده، به طور کامل از خروج رطوبت داخل ملات جلوگیری نمی نماید لذا همین موضوع سبب افزایش جمع شدگی ملات ها در عمل آوری با مواد عمل آورنده نسبت به عمل آوری در آب می گردد. همچنین با توجه به شکل ۷ مشاهده می شود که اکثر جمع شدگی تا سن ۴۲ روز اتفاق افتاده و پس از آن شیب نمودار جمع شدگی در حال کاهش می باشد. در تحقیق مشابه دیگری ذکر شده است که بخش اعظم مقدار جمع شدگی حاصل از خشک شدگی، تا سن ۴۲ روزگی به وقوع می پیوندد و پس از سن ۹۰ روزگی، جمع شدگی کاهش چشمگیری می یابد [۳۳].

جهت نشان دادن ترک های به وجود آمده در داخل ملات ها بعد از خروج از عمل آوری، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، از ملات ها عکسبرداری صورت پذیرفت. در شکل ۹- الف، ملات تحت عمل آوری داخل آب نشان داده شده است. مشاهده می شود تا زمانیکه ملات تحت عمل آوری قرار دارد، هنوز جمع شدگی اتفاق نیفتاده و ملات دچار ترک خوردگی نشده است. اما مطابق با شکل ۹- ب که مربوط به ملاتی است که مدتی در فضای آزاد رها گردیده است مشاهده می گردد که به دلیل خروج آب از منافذ موئینه داخل ملات و همچنین از دست رفتن آب جذب سطحی شده، جمع شدگی حاصل گردیده که نتیجه آن ایجاد ترک در داخل ملات می باشد.

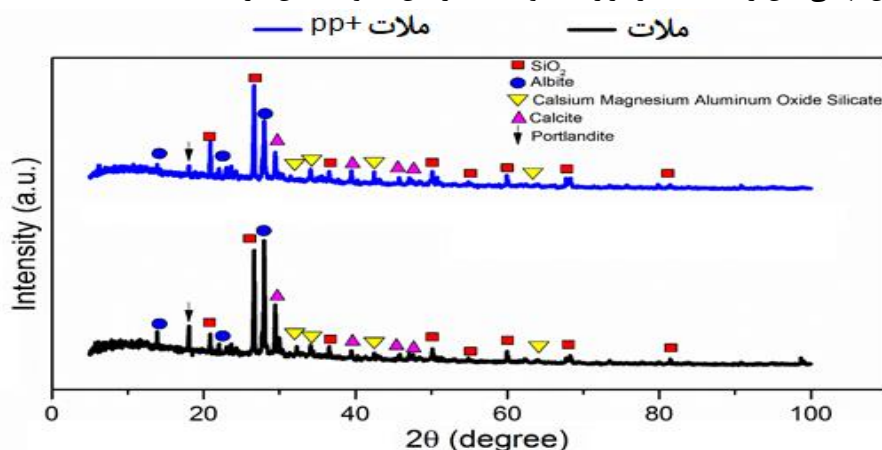


ب) ملات دارای ترک

الف) ملات بدون ترک خوردگی

شکل ۹: عکسبرداری از ملات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت بررسی دقیقتر فازها و ساختار کریستالوگرافی ذرات موجود در بتن قبل و پس از افزودن الیاف PP، از این نمونه ها آزمون XRD بعمل آمده و نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزودن الیاف، شدت پیک Ca(OH)_2 یا هیدروکسید کلسیم که با فلش مشکی رنگ نشان داده شده است، کاهش یافته است. در واقع با مصرف هیدروکسید کلسیم، مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته (ژل C-S-H) افزایش می یابد. تبدیل هیدروکسید کلسیم موجود در ساختار بتن به سیلیکات کلسیم هیدراته طی فرآیند هیدراسیون می تواند خواص نهایی بتن را تحت تاثیر قرار داده و باعث افزایش مقاومت بتن گردد.

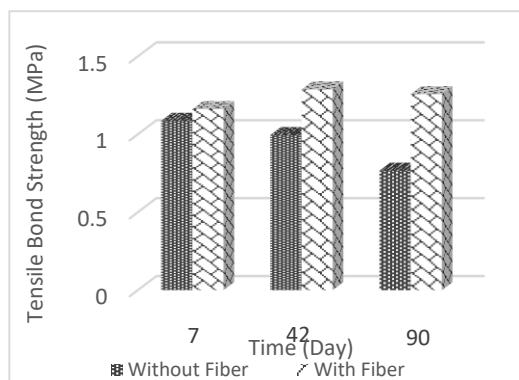


شکل ۱۰: الگوی پراش اشعه ایکس (XRD)

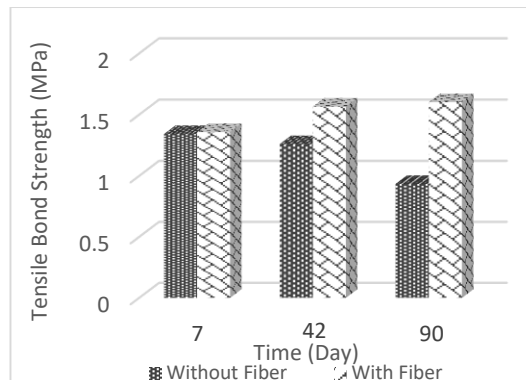
۳-۲ مقاومت چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی

مقاومت چسبندگی کششی

در شکل ۱۱ مقدار مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" برای ملات M1 (۰/۵ - ۳ - ۱) نشان داده شده است.



(ب) عمل آوری با مواد عمل آورنده

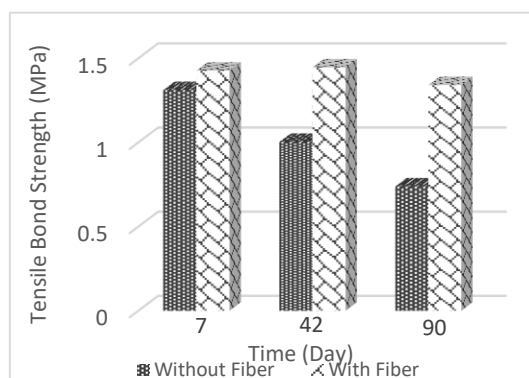


(ف) عمل آوری با آب

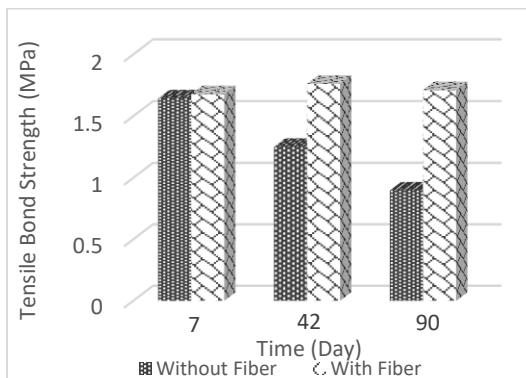
شکل ۱۱: مقاومت چسبندگی کششی برای ملات M1 (۵/۰ - ۳ - ۱)

از شکل ۱۱ مشاهده می شود که افزودن الیاف باعث بهبود چشمگیر مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری M1 و بستر بتنی می گردد. در سن ۷ روز که ملات تازه از عمل آوری خارج گردیده، الیاف تاثیر زیادی روی مقاومت چسبندگی کششی نگذاشته است. از شکل ۱۱- الف مشاهده می شود که 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. برای ملات عمل آوری شده با مواد عمل آورنده نیز شاهد افزایش مقاومت چسبندگی کششی به مقدار ۲۲/۷ و ۳۹/۱ درصد به ترتیب در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه می باشیم. علت افزایش مقاومت چسبندگی ملات حاوی الیاف، به دلیل کنترل افزایش عرض ترک ها و مقدار جمع شدگی توسط الیاف می باشد. همانطور که در قسمت قبلی اشاره شد، الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش مقدار جمع شدگی بر اثر خشک شدگی ملات تعمیری می گردد. همچنین در مقایسه ی ملات های تحت عمل آوری های مختلف مشاهده می شود که ملات عمل آوری شده با آب، دارای مقاومت چسبندگی کششی بیشتری نسبت به ملات عمل آوری شده با مواد عمل آورنده می باشد. زیرا مواد عمل آورنده نمی تواند به طور کامل از تبخیر آب موجود در منافذ موئینه جلوگیری نماید که همین موضوع باعث شروع خشک شدن ملات شده و تاثیر منفی بر مقاومت چسبندگی می گذارد.

در شکل ۱۲ مقدار مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" برای ملات M2 (۵/۰ - ۲ - ۱) نشان داده شده است.



(ب) عمل آوری با مواد عمل آورنده



(ف) عمل آوری با آب

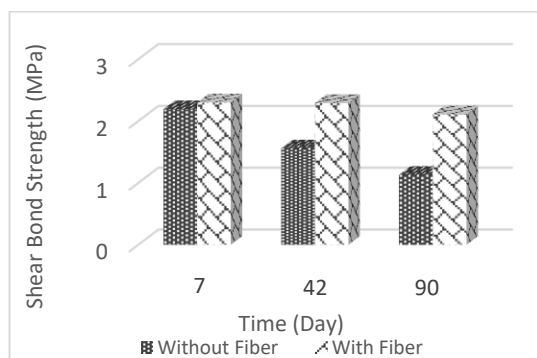
شکل ۱۲: مقاومت چسبندگی کششی برای ملات M2 (۵/۰ - ۲ - ۱)

مطابق شکل ۱۲، در این ملات نیز مانند ملات M1، افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی بین لایه تعمیری و بستر بتنی می گردد. همچنین مقدار مقاومت چسبندگی برای ملات عمل آوری شده در آب بیشتر از ملات عمل آوری شده با

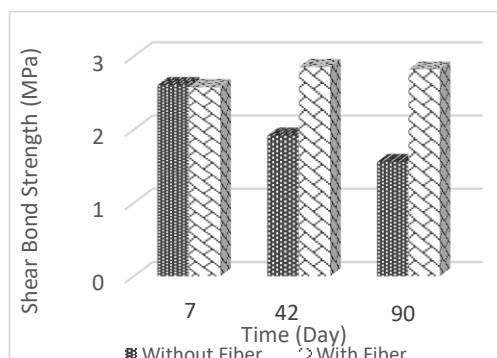
مواد عمل آورنده می باشد. مقدار افزایش مقاومت چسبندگی کششی ملات الیافی نسبت به ملات بدون الیاف در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه برای ملات عمل آوری شده در آب برابر است با ۲۹ و ۴۷/۶ درصد. برای مواد عمل آورنده نیز مقدار این افزایش برای سنین مذکور برابر است با ۳۰/۶ و ۴۴/۹ درصد.

مقاومت چسبندگی برشی

در شکل ۱۳ مقدار مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری و بستر بتنی حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" برای ملات M1 (۱ - ۳ - ۰/۵) نشان داده شده است. از شکل ۱۳ ملاحظه می شود که الیاف باعث بهبود مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری M1 و بستر بتنی حاصل از روش "انتقال اصطکاک" گردیده است. برای ملات عمل آوری شده در آب، مقدار افزایش مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۳۲/۹ و ۴۴/۷ درصد شده است. برای ملات عمل آوری شده با مواد عمل آورنده نیز مقدار افزایش مقاومت چسبندگی برشی در سنین مذکور برابر ۳۲ و ۴۶/۴ درصد می باشد. مشاهده می شود که نتایج حاصل از روش "انتقال اصطکاک" مانند روش "کشیدن از سطح" برای ملات عمل آوری شده در آب بیشتر از ملات عمل آوری شده با مواد عمل آورنده می باشد که دلیل آن قبلاً ذکر گردیده است.



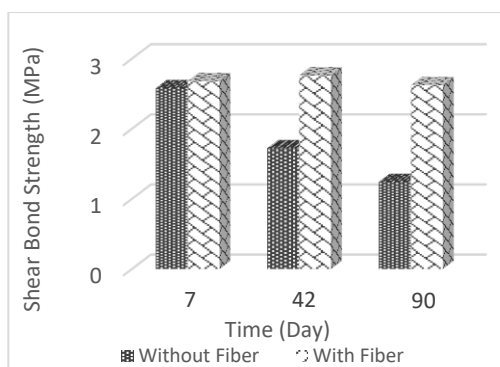
(ب) عمل آوری با مواد عمل آورنده



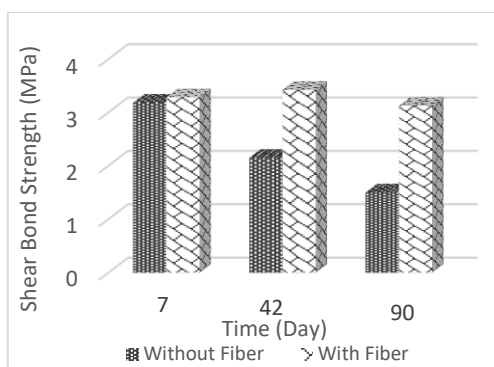
(الف) عمل آوری با آب

شکل ۱۳: مقاومت چسبندگی برشی برای ملات M1 (۱ - ۳ - ۰/۵)

در شکل ۱۴ مقدار مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری و بستر بتنی حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" برای ملات M2 (۱ - ۲ - ۰/۵) نشان داده شده است. از شکل ۱۴ مشاهده می شود که افزودن الیاف به ملات M2 باعث افزایش مقدار مقاومت چسبندگی برشی بین بستر بتنی و ملات تعمیری گردیده است. افزایش مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه برای مواد عمل آوری شده با آب به ترتیب برابر ۳۷/۲ و ۵۱/۹ درصد می باشد. همچنین برای ملات عمل آوری شده با مواد عمل آورنده، مقدار افزایش مقاومت چسبندگی برشی ملات الیافی در سنین مذکور به ترتیب برابر ۳۷/۶ و ۵۲/۶ درصد می باشد. همانند نتایج قبلی، در این قسمت نیز مقدار مقاومت چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی برای ملات عمل آوری شده در آب بیشتر از ملات عمل آوری شده با مواد عمل آورنده می باشد.



ب) عمل آوری با مواد عمل آورنده



الف) عمل آوری با آب

شکل ۱۴: مقاومت چسبندگی برشی برای ملات M2 (۱/۵ - ۲ - ۱)

در کل مشاهده شد که الیاف دارای تاثیر چشمگیر در مقاومت چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی می باشد و باعث افزایش آن می گردد. همچنین مقاومت چسبندگی ملات های عمل آوری شده در آب، بیشتر از نمونه های عمل آوری شده با مواد عمل آورنده می باشد. همچنین اکثر شکست ها به طور کامل در مرز بین ملات تعمیری و بستر بتنی رخ داد و فقط در تعداد بسیار محدودی از نمونه ها، شکست به طور کامل در مرز بین سطوح اتفاق نیفتاد که تاثیر زیادی در نتایج نداشته و قابل چشم پوشی می باشد. در اشکال ۱۱ تا ۱۴ مشاهده می گردد که در سن ۷ روز تفاوت زیادی بین مقاومت چسبندگی برشی و کششی برای ملات های مسلح به الیاف با ملات های ساده بدون الیاف وجود ندارد. علت این امر به دلیل عمل آوری نمونه ها به مدت ۷ روز داخل آب می باشد. با توجه به اینکه یکی از اثرات مثبت الیاف در ملات ها، جلوگیری از افزایش عرض ترک ها و لذا کاهش مقدار جمع شدگی می باشد، به دلیل اینکه نمونه ها داخل آب قرار داده شده اند به همین خاطر دچار خشک شدگی، ترک خوردگی و جمع شدگی نگردیده اند. همین امر سبب می شود که در سنین اولیه که ملات ها داخل آب قرار دارند، الیاف تاثیر چندانی بر مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات و بتن بستر نداشته باشند. اما در سنین بالاتر که نمونه ها از عمل آوری خارج شده اند، تاثیر الیاف بر چسبندگی بسیار چشم گیر می باشد. زیرا همانطور که توضیح داده شد ملات های معمولی رها شده در فضای آزاد دچار ترک خوردگی، جمع شدگی و کاهش مقاومت چسبندگی می شوند در صورتیکه ملات های مسلح به الیاف، در برابر ترک خوردگی و جمع شدگی مقاومت نموده و از افت چسبندگی بین ملات و بستر جلوگیری می نماید.

همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح"

نتایج نشان می دهد که مقدار مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" بیشتر از مقاومت چسبندگی کششی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" می باشد. در جدول ۴ مقایسه ای بین نتایج حاصل از مقاومت چسبندگی برشی و کششی حاصل از این تحقیق با دو تحقیق دیگر قابل مشاهده می باشد.

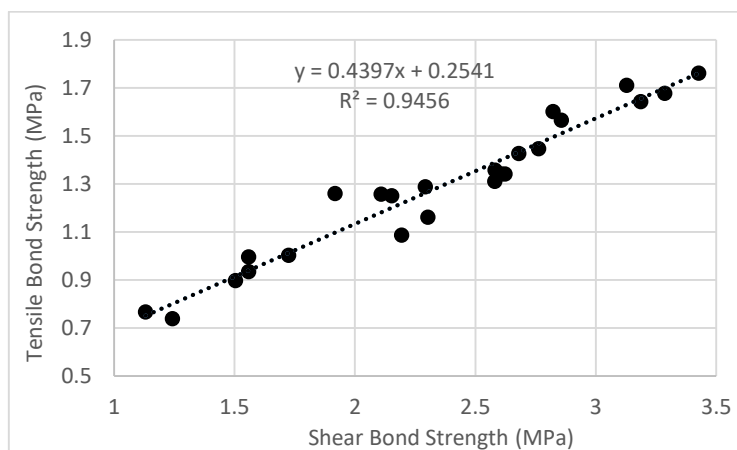
جدول شماره ۴: مقایسه مقاومت چسبندگی برشی به کششی

تحقیق	نسبت مقاومت چسبندگی برشی به کششی
نتایج حاصل از این تحقیق	۱/۸۱
Silfwerbrand, 2003 [۳۴]	۱/۹
Chendes et al, 2013 [۳۵]	۱/۸۵

از مقایسه اشکال ۱۱ تا ۱۴ و با توجه به جدول ۳ ملاحظه می شود که مقاومت چسبندگی برشی برای نمونه های با و بدون الیاف در هر دو عمل آوری به طور میانگین ۱/۸۱ برابر مقاومت چسبندگی کششی می باشد. در تحقیقی دیگر، که در خصوص مقایسه مقاومت چسبندگی برشی و کششی ملات های تعمیری معمولی با بستر بتنی انجام شد ملاحظه شد که نسبت مقاومت چسبندگی برشی به مقاومت

چسبندگی کششی بالاتر از ۱/۹ می باشد [۳۴]. همچنین در یک تحقیق دیگر با انجام آزمایشات مشاهده گردید که نسبت مقاومت چسبندگی برشی به کششی برابر ۱/۸۵ می باشد [۳۵]. مشاهده می گردد که نتایج حاصل از این مقاله با نتایج حاصل از برخی مقالات مشابه بسیار به یکدیگر نزدیک می باشند.

در شکل ۱۵ همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" قابل مشاهده می باشد. در روی شکل هر نقطه، متوسط سه خوانش می باشد.



شکل ۱۵: همبستگی بین نتایج آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" (MPa)

از شکل ۱۵ ملاحظه می گردد که ضریب تعیین بین مقاومت چسبندگی برشی و کششی به دست آمده از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" برابر ۰/۹۴ می باشد. همچنین شدت ضریب همبستگی خطی بین دو روش مذکور برابر ۰/۹۶ است. با توجه به شدت همبستگی بالا بین نتایج حاصل از روش های "کشیدن از سطح" و "انتقال اصطکاک"، می توان به آسانی از نتایج یکی، نتایج معادل دیگری را به دست آورد. بد نیست متذکر شویم که با عنایت به سادگی و ارزانی دستگاه "انتقال اصطکاک" می توان برای تعیین مقاومت چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی، این روش را جایگزین روش "کشیدن از سطح" نمود که تجهیزات آن دارای قیمت گزاف و نیاز به کالیبراسیون متداوم دارد.

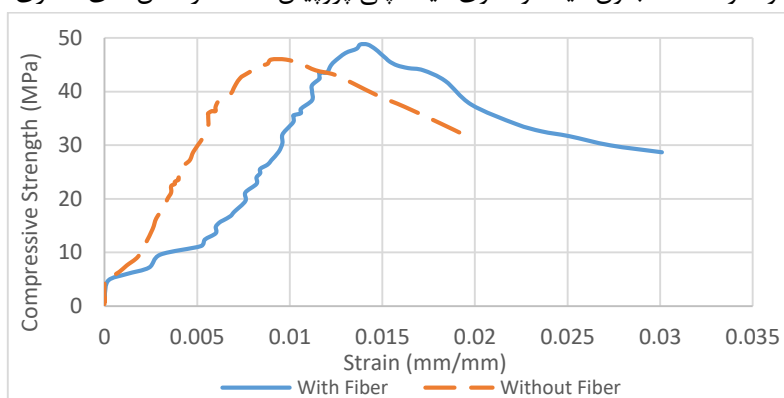
۳-۳ ارزیابی درجای مقاومت فشاری ملات

برای به کارگیری روش های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" جهت ارزیابی مقاومت فشاری ملات های تعمیری، نمونه های ملات با طرح اختلاط ۰/۵ - ۲ - ۱ ساخته و تا زمان آزمایش در عمل آوری های "داخل آب" و با "مواد عمل آورنده" قرار گرفتند. سپس در سنین ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه از عمل آوری خارج شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. سپس همبستگی بین قرائت های به دست آمده از روش های درجای مذکور با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی استاندارد تعیین گردید. مقاومت فشاری ملات های تعمیری در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می شود که افزودن ۰/۳ درصد الیاف باعث افزایش مقاومت فشاری ملات ها گردیده است. افزایش مقاومت فشاری ملات ها تحت عمل آوری با آب با افزودن الیاف در سنین ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۴/۹، ۵/۸، ۳/۷ و ۴ درصد می باشد. همچنین مقدار افزایش برای نمونه های عمل آوری شده با مواد عمل آورنده در سنین مذکور به ترتیب برابر ۵/۶، ۵/۱، ۴/۴ و ۳/۷ درصد می باشد. به طور کلی افزودن ۰/۳ درصد الیاف به ملات برای نمونه های عمل آوری شده در آب و با مواد عمل آورنده باعث افزایش مقاومت فشاری به طور متوسط برابر ۴/۶ و ۴/۷ درصد می باشد.

جدول ۵: نتایج مقاومت فشاری ملات های تعمیری (MPa)

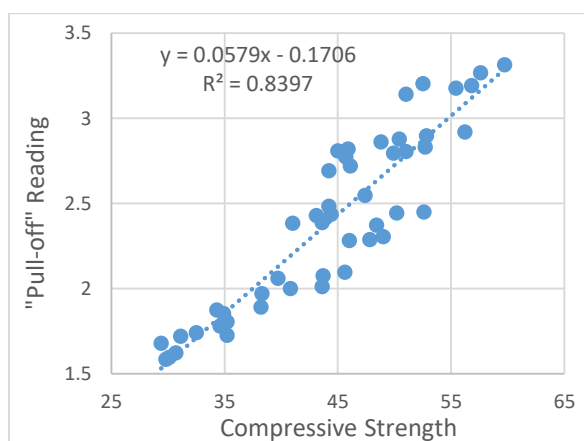
	نوع ملات	روز ۷		روز ۲۸		روز ۴۲		روز ۹۰	
		آب	مواد عمل آورنده	آب	مواد عمل آورنده	آب	مواد عمل آورنده	آب	مواد عمل آورنده
مقاومت فشاری	ملات ساده	۳۴/۱	۳۰/۲	۴۷/۶	۴۰/۹	۵۱/۲	۴۳	۵۴/۴	۴۵/۱
	ملات الیافی	۳۵/۸	۳۱/۹	۵۰/۴	۴۳	۵۳/۱	۴۴/۹	۵۶/۶	۴۶/۶

در شکل ۱۶، رفتار دو نمونه ملات بدون الیاف و حاوی الیاف پلی پروپیلن تحت اثر تنش های فشاری نشان داده شده است.

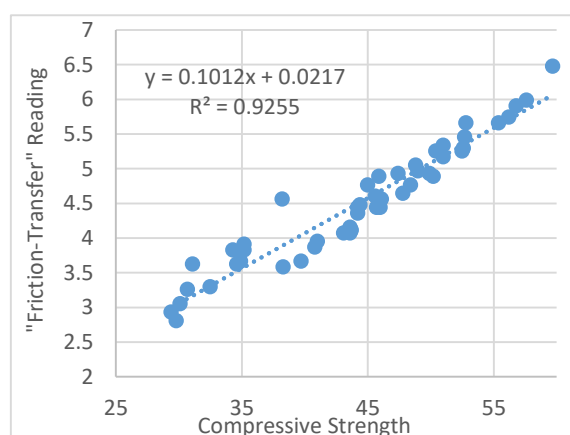


شکل ۱۶: مقایسه رفتار ملات در دو حالت با و بدون الیاف

هدف از افزودن الیاف به ملات، به تاخیر انداختن ترک خوردگی و همچنین افزایش طاق با انتقال تنش در عرض مسیر افزایش ترک ها می باشد، به طوری که امکان تغییر شکل های بسیار بزرگتری تحت تنش اوج نسبت به ملات بدون الیاف وجود داشته باشد. با توجه به شکل ۱۶ شاهد افزایش طاق در فشار برای نمونه حاوی الیاف می باشیم. نمونه بدون الیاف در تنش ۴۶ مگاپاسکال دچار شکست گردیده در صورتی که نمونه الیافی تنش حدود ۴۸/۸ مگاپاسکال را تحمل نموده است. شکست نمونه الیافی در کرنش ۰/۰۱۴۲ رخ داده است در صورتی که برای نمونه بدون الیاف، شکست در کرنش ۰/۰۰۹۸ رخ داده است که حدود ۴۵ درصد کاهش پیدا نموده است. در شکل ۱۷ شدت همبستگی بین مقاومت فشاری نمونه ها با آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" نشان داده شده است.



ب) "کشیدن از سطح" - مقاومت فشاری



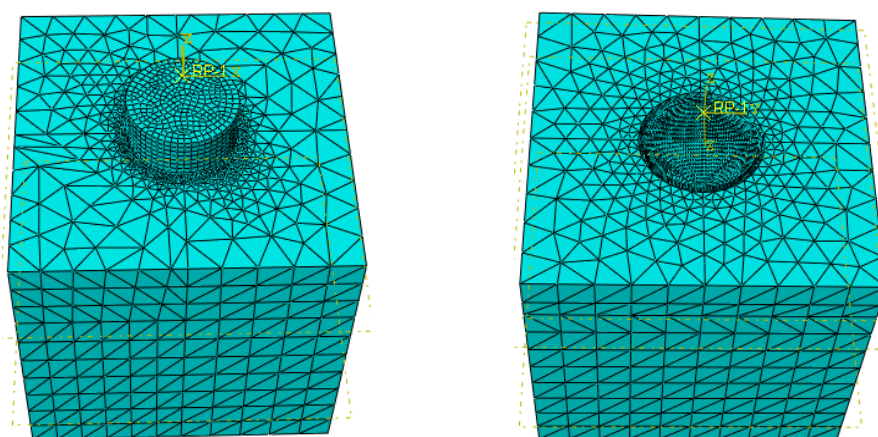
الف) "انتقال اصطکاک" - مقاومت فشاری

شکل ۱۷: همبستگی بین نتایج آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" با مقاومت فشاری ملات

با توجه به شکل ۱۷ ملاحظه می شود که همبستگی بالایی بین نتایج حاصل از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن" با مقاومت فشاری ملات های تعمیری وجود دارد. نتایج آزمون "انتقال اصطکاک" با مقاومت فشاری ملات تعمیری دارای ضریب همبستگی ۹۵ درصد و ضریب تعیین ۹۲ درصد می باشد. همچنین ضریب تعیین بین نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" با مقاومت فشاری برابر ۸۴ درصد و ضریب همبستگی برابر ۹۱ درصد می باشد. با توجه به ضریب همبستگی بالای بین مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از روش های مذکور، به راحتی می توان با استفاده از آزمون های درجای "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح"، مقاومت فشاری ملات را در سنین مختلف ارزیابی نمود. از اشکال ۱۷ مشاهده می گردد که معادلات خطی $y = 0.101x + 0.021$ و $y = 0.058x + 0.017$ به ترتیب جهت تبدیل قرائت های به دست آمده از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" برای مقاومت فشاری ملات هابه دست آمده است.

مدل سازی آزمون های "کشیدن از سطح" و "انتقال اصطکاک" با نرم افزار اجزا محدود ABAQUS

مشخص نمودن رفتار غیر خطی مصالح سیمانی مهمترین مرحله در مدل سازی عددی این نوع ماده می باشد. در نرم افزار المان محدود ABAQUS، رفتار غیر خطی مصالح ترد را می توان به سه روش مدل شکست ترد، مدل ترک پخشی و مدل خسارت پلاستیک بتن تعریف نمود. بر حسب نیاز، هر کدام از این مدل ها دارای مزایایی می باشند که می توانند مورد استفاده قرار گیرند. مدلی که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است، مدل خسارت پلاستیک بتنی باشد. در این مدل فرض بر این است که دو جنبه اصلی مکانیسم گسیختگی، ترک کششی و خرد شدگی فشاری می باشد. پس از معرفی مواد و منحنی تنش کرنش و مقادیر مورد نیاز از قسمت Module Property و دستور Create Material می بایست از مش بندی مناسب استفاده نمود. یکی از مسائل پر اهمیت در مش بندی نمونه ها، همگرایی می باشد. همواره نتایج به دست آمده در روش های المان محدود به سایز و نوع مش های مورد استفاده وابسته می باشد. با کاهش دادن ابعاد المان ها، حل مساله به یک جواب واحد همگرا می گردد. با توجه به وابستگی پاسخ ها به سایز مش بندی، باید در نواحی ای از مدل که مقادیر تنش، کرنش و یا... می بایست به طور دقیق محاسبه شود، همگرایی مش بندی کنترل گردد. در آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح"، مش بندی در قطعه ی مکعبی ملات به صورت ترکیبی از دو نوع المان C3D4 و C3D8R می باشد. بخش اصلی در مدل سازی که تحت کشش یا فشار قرار می گیرد با المان مکعبی ۸ گرهی و با انتگرال کاهش یافته C3D8R المان بندی شدند. برای به دست آوردن اندازه مناسب المان ها در این مدل سازی، ابتدا همگرایی پاسخ ها با المان بندی بین اندازه های ۰/۵، ۱ و ۲ میلی متر انجام شد که از بین آن ها اندازه المان ۱ میلی متر انتخاب گردید. همچنین بخش های کناری که با نوع المان تتراگونال ۴ گرهی پیوسته المان بندی شده اند با حداقل اندازه المان ۱ میلی متر در نواحی متصل به المان های اصلی و حداکثر اندازه المان ۱۵ میلی متر در کناره ها، المان بندی شدند. همچنین در آزمون "کشیدن از سطح"، قطعه چسب با اندازه المان ۲ میلی متر با نوع المان C3D8R و قطعه ی فولادی با اندازه المان ۲ میلی متر المان بندی شد. المان ها در راستای محوری برای قطعه فولادی برابر ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شدند (شکل ۱۸).



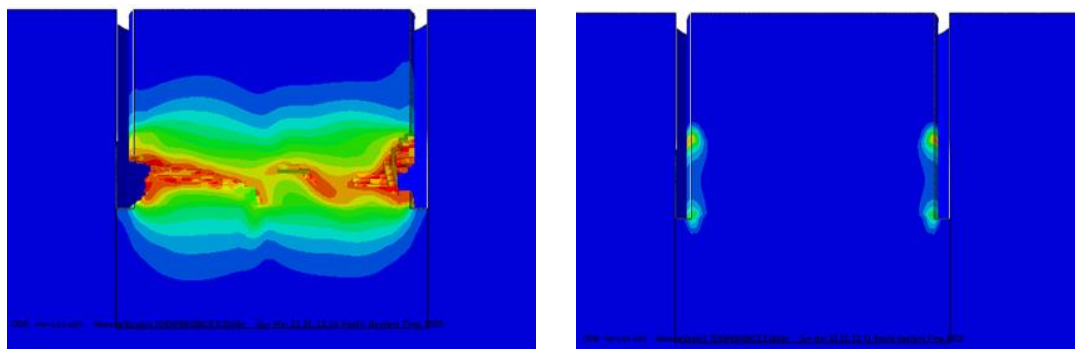
ب) کشیدن از سطح

الف) انتقال اصطکاک

شکل ۱۸: مش بندی نمونه ها در نرم افزار

برای مدل سازی ها، از نتایج دو نمونه ملات با و بدون الیاف پلی پروپیلن که در آزمایشگاه تحت شرایط عمل آوری در آب بوده استفاده گردید. مطابق جدول شماره ۵، نمونه ی بدون الیاف دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۴۷/۶ مگاپاسکال و نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن دارای مقاومت فشاری ۵۰/۴ مگاپاسکال که رفتار آن ها مطابق آنچه در شکل ۱۶ نشان داده شد، می باشد. نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" برای نمونه بدون الیاف برابر ۱۰۹ نیوتن متر و برای نمونه حاوی الیاف برابر ۱۱۵ نیوتن متر به دست آمد. برای مدل سازی نمونه در آزمون "انتقال اصطکاک"، گشتاور پیچشی به صورت دوران جابجایی حول محور مغزه و به محیط مغزه به کمک قید کوپلینگ اعمال گردید. نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" برای نمونه بدون الیاف و حاوی الیاف به ترتیب برابر ۴۵۰۰ و ۴۷۵۰ نیوتن به دست آمد.

در آزمون "انتقال اصطکاک"، گشتاور نهایی که عامل شکست مغزه شده است به میزان ۱۰۷ نیوتن متر به دست آمد. در حالی که این میزان در مدل الیافی به میزان ۱۱۴ نیوتن متر رسیده است. اولین ترک ها در نمونه ها در گوشه ها که تحت بیشترین تنش هستند رخ داد. در ملات معمولی، گشتاور با افزایش دوران به صورت ملایم افزایش می یابد تا زمانی که ترک ها به یکدیگر رسیده و خرابی اولیه رخ دهد. از این لحظه به بعد سرعت خرابی ها به دلیل کاهش سطح مقطع و کاهش مقاومت مغزه، بیشتر می گردد تا در گشتاور ۱۰۷ نیوتن متر دچار شکست گردد. اما ملات الیافی تا گشتاور ۱۱۴ نیوتن متری را تحمل نموده و سپس دچار شکست گردیده است. مشاهده می شود که افزودن الیاف به ملات باعث بهبود رفتار آن شده و همچنین همخوانی بالایی بین نتایج به دست آمده از آزمون "انتقال اصطکاک" در آزمایشگاه و نمونه مدل سازی شده با نرم افزار وجود دارد. در شکل ۱۹ نمایی از شروع ترک ها و زمان شکست در آزمون "انتقال اصطکاک" نشان داده شده است.

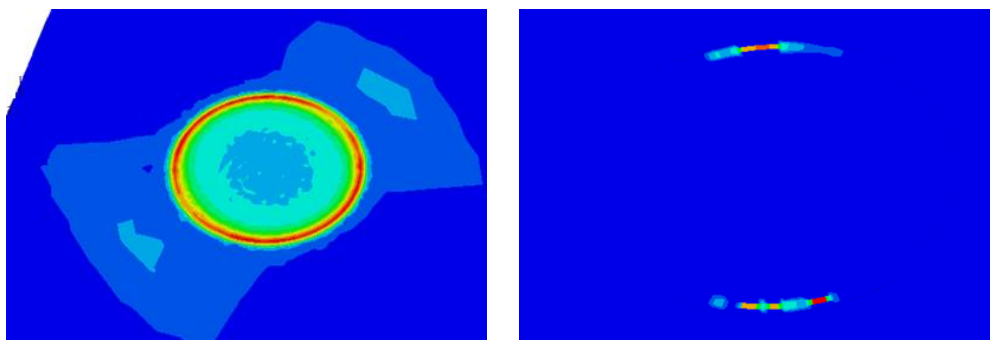


(ب) لحظه شکست

(الف) شروع ترک ها

شکل ۱۹: نمایی از تنش های به وجود آمده در آزمون انتقال اصطکاک

در آزمون "کشیدن از سطح"، ترک های اولیه در نمونه ی حاوی الیاف در نیروی ۲۷۰۱ نیوتن بدون الیاف در کناره های محل اتصال ایجاد شدند. در حالیکه در ملات معمولی، ترک های اولیه در نیروی ۲۲۴۸ نیوتن ظاهر شدند. مدل ملات الیافی در نیروی ۴۹۰۵ به بار بحرانی رسیده در صورتیکه مدل معمولی در نیروی ۴۵۵۵ نیوتن دچار شکست گردیده است. مشاهده می شود که افزودن الیاف به ملات باعث بهبود رفتار آن شده و همچنین همخوانی بالایی بین نتایج به دست آمده از آزمون "کشیدن از سطح" در آزمایشگاه و نمونه مدل سازی شده با نرم افزار وجود دارد. در شکل ۲۰ نمایی از شروع ترک ها و تنش نهایی در نمونه مکعبی نشان داده شده است.



ب) تنش حداکثر در زیر استوانه

الف) شروع ترک ها

شکل ۲۰: نمایی از تنش های به وجود آمده در آزمون "کشیدن از سطح"

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر جمع شدگی، رفتار فشاری و مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات های تعمیری و بستر بتنی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایشات از آزمون نوین "انتقال اصطکاک" استفاده گردید و نتایج آن با آزمون "کشیدن از سطح" مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات های مسلح به الیاف پلی پروپیلن به صورت درجا و در سنین مختلف، رابطه همبستگی بین قرائت های به دست آمده از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" با آزمون آزمایشگاهی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در ادامه نتایج به دست آمده از این تحقیق قابل مشاهده می باشد.

- معادلات خطی $y = 0.101x + 0.021$ و $y = 0.058 - 0.017x$ به ترتیب جهت تبدیل قرائت های به دست آمده از آزمون های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" به مقاومت فشاری ملات ها پیشنهاد می گردد.

- افزایش چشمگیر مقاومت چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی با اضافه نمودن الیاف پلی پروپیلن به ملات مشاهده گردید. به گونه ای که مقاومت چسبندگی برشی و کششی ۹۰ روزه ملات مسلح به الیاف به ترتیب ۴۸/۹ و ۴۳/۳ درصد بیشتر از ملات ساده می باشد.

- همبستگی بالایی بین مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" و مقاومت چسبندگی کششی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" وجود دارد که این امکان را فراهم می نماید تا برای اندازه گیری چسبندگی، به جای استفاده از دستگاه گران قیمت "کشیدن از سطح"، از دستگاه "انتقال اصطکاک" استفاده نمود که بسیار ساده و ارزان می باشد.

- الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش جمع شدگی حاصل از خشک شدگی ملات تعمیری گردیدند به طوری که جمع شدگی ملات های مسلح به الیاف پلی پروپیلن به مقدار ۱۲/۷ درصد کمتر از ملات ساده می باشد.

- همخوانی بالایی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی روش های "انتقال اصطکاک" و "کشیدن از سطح" با نرم افزار ABAQUS وجود دارد.

- نتایج حاصل از مدل سازی عددی نشان می دهد که الیاف باعث بهبود رفتار ملات ها شده و با به تاخیر انداختن شروع ترک خوردگی و با تحمل تغییر شکل های بیشتر در تنش های اوج، موجب افزایش طاقت ملات می گردد.

مراجع

- [1] Tilly, G.P. Jacobs, J. (2007). "Concrete repairs: Observations on performance in service and current practice". Watford, UK,.
- [2] Wu, D. Gao, W. Feng, J. Luo, K. (2016). Structural behaviour evolution of composite steel-concrete curved structure with uncertain creep and shrinkage effects, *Composites Part B: Engineering*, 86, 261-272.
- [3] Martinola, G. Sadouki, H. Wittmann, F. (2001). "Numerical model for minimizing the risk of damage in a repair system", *J. Mater. Civ. Eng.*, 13, 121-129.
- [4] Beushausen, H. Alexander, M. (2007). "Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage", *Mater. Struct.*, 40, 189-199.
- [5] Fanf, L. Peiming, W. Xiaojie, Y. (2005). Effect of polypropylene fiber on dry shrinkage ratio of cement mortar. *Journal of Building Materials*. Vol. 8-4, pp. 373-377.
- [6] Bakhtiari, A., Sharifzadeh, M., and Kazemi, A. (2014). Examination of concrete microstructure containing polypropylene and quartz fibers by scanning electron microscopy. 2nd International Congress on Structure, Architecture and Urban Development, 16-18 December, Tabriz, Iran.
- [7] Mohamedm R.A.S. (2006). Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete. *Journal of Engineering Sciences*, Assiut University, Vol. 34, pp. 1049-1059.
- [8] Vairagade, V.S. Kene, K.S. (2012). Deshpande. Investigation on compressive and tensile behavior of fibrillated polypropylene fibers reinforced concrete. Vol. 2-3, pp. 1111-1115.
- [9] Dharan, D.S. Lai, A. (2016). Study the effect of polypropylene fiber in concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 03 – 06, pp. 616-619.
- [10] Building and Housing Research Center. (2008) *The National Method for Concrete Mix Design*, BHRC Publication No.S-479.
- [11] Santandrea, M., Imohamed, I. A. O., Jahangir, H., Carloni, C., Mazzotti, C., De Miranda, S., ... & Casadei, P. (2016). 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).
- [12] Bagheri, M., Chahkandi, A., & Jahangir, H. (2019). Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers. *International Journal of Civil Engineering*, 17(11), 1785-1797.
- [13] Jahangir, H., & Esfahani, M. R. (2020). Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour. *Steel and Composite Structures*, 34(6), 877-889.
- [14] Jafarinejad, S., Rabiee, A., and Shekarchi, M. (2019). Experimental investigation on the bond strength between Ultra high strength Fiber Reinforced Cementitious Mortar & conventional concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 220, 116814.
- [15] Ebead, U., and Younis, A. (2019). Pull-off characterization of FRCM/Concrete interface. *Composite Part B*, Vol 165, pp. 545-553.
- [16] Sabah, S.H., Hassan, M.H., Bunnori, N., and Johari, M.A. (2019). Bond strength of the interface between normal concrete substrate and GUSMRC repair material overlay. *Construction and Building Materials*, Vol. 216, pp. 261-271.
- [17] Naderi, M (2009) Analysis of the slant shear test, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(2), 229-245.
- [18] ASTM C1583, (2004). 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.
- [19] Naderi, M. (2008). "Adhesion of different concrete repair systems exposed to different environments," *J. Adhes.*, vol. 84, no. 1, pp. 78-104.
- [20] Naderi, M., Shibani, R. (2013) New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength. *Australian Journal of Basic Applied Sciences*. 7(2). p. 438-447.
- [21] Naderi, M. (2005). "Friction-Transfer Test for the Assessment of in-situ Strength & Adhesion of Cementitious Materials", *Construction & Building Materials*, 19 (6) 454-459.
- [22] Naderi, M. (2011). An alternative method for in situ determination of rock strength, *Can. Geotech. J.* 48: 1901-1905.

- [23] Naderi, M. (2006). Evaluating in situ shear strength of bituminous pavements, Proceedings of the institution of Civil Engineering, pp 61-65.
- [24] Naderi, M. Ghodousian, O. (2012). Adhesion of Self-Compacting Overlays Applied to Different Concrete Substrates and Its Prediction by Fuzzy Logic, The Journal of Adhesion, 88:10, 848-865.
- [25] Naderi, M. (2008). Effects of Cyclic Loading, Freeze-Thaw and Temperature Changes on Shear Bond Strengths of Different Concrete Repair Systems, The Journal of Adhesion, 84:9, 743-763.
- [26] ASTM C136-01. (2001). "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", American Society for Testing and Materials.
- [27] ASTM C128. (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- [28] ASTM C127. (2012). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- [29] ACI 544.1R-98. Reapproved (2002). Report on fiber reinforced concrete, Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute.
- [30] C. ASTM C157. (2008). Test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- [31] ASTM C490. (2011). 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.
- [32] ASTM C109. (2013). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), American Society for Testing and Materials.
- [33] Alnkaa, A. Yaprak, H. MEMİŞ, S. and Kaplan, G. (2018). "Effect of Different Cure Conditions on the Shrinkage of Geopolymer Mortar." International Journal Of Engineering Research And Development, vol. 14, no 10, pp. 51-55.
- [34] Silfwerbrand, J. (2003). "Shear bond strength in repaired concrete structures", Materials and Structures, 36, 419-424.
- [35] Chendes, R. Dan, S. and Courard, L. (2013) "Comparison of shear and pull-off tests for testing adhesion of different content limestone fillers mortars used as repair system," Constr. Sustain. Effic. Solut. Des. Exec. Rehabil. Build.