



## Using “twist-off” and “pull-off” tests to investigate the effect of polypropylene fibers on the bond of mortar/concrete and to evaluate their in-situ compressive strength

A. Saberi Varzaneh, M. Naderi

Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

**ABSTRACT:** In the concrete repair industry, the adhesion between the repair layer and the concrete plays a decisive role in the successful composite performance of the repair layers. Due to the shrinkage and its effect on adhesion loss, in this paper, the effect of polypropylene fibers on the adhesion between mortar/concrete has been investigated. A new “twist-off” test has been used to perform the experiments. In all experiments, the results of the “twist-off” test were compared with the results of the “pull-off” test. X-ray diffraction patterns and scanning electron microscopy tests were used to further analyze the results. Also, the effect of fibers on shrinkage and mechanical properties of mortars and its relationship to adhesion between mortar and concrete were investigated. In this regard, the tests of “twist-off” and “pull-off” were used in the laboratory and compared with the outputs of computer modeling. Also, by examining the correlation coefficient between the results of in-situ tests and laboratory tests, calibration diagrams were presented to convert the readings obtained from the “twist-off” and “pull-off” tests into the compressive strength of mortars. The results indicate that for the fibrous sample, the peak intensity of Ca (OH)<sub>2</sub> or calcium hydroxide is reduced, resulting in the production of more hydrated calcium silicate or C-S-H gel, which results in improved final properties of the mortar and increased adhesion. Also, on average, the shear and tensile bond strength of 90 days obtained from “twist-off” and “pull-off” tests with the addition of fibers increased by 49.5% and 43.1%, respectively.

### Review History:

Received: May, 04, 2020  
Revised: Jun. 21, 2021  
Accepted: Jul. 13, 2021  
Available Online: Aug. 10, 2021

### Keywords:

“Twist-off”  
“Pull-off”  
Adhesion  
Mortar  
Concrete

### 1- Introduction

A common problem caused by poor bond strength between repair mortar and the concrete substrate is the shrinkage. In addition to the deformations caused by stresses, volumetric changes resulted from shrinkage or temperature changes are highly significant because these movements are usually not locally or completely restrained in practice, which leads to stress within the mortar. The tensile stresses in mortar and concrete are very destructive because they have poor elasticity and a high tendency toward cracking. As there is water in the capillary pores of hydrated cement pastes, it should be noted that immediately after the water removal from the capillary pores, the water is also removed from the surface and the shrinkage occurs [1]. Wet curing practices are one of the methods utilized to prevent moisture removal from the interior part of the mortar. One study demonstrated that the bond between the repair mortar and concrete substrate under wet curing practices was about 3.5 times higher than that released in the open space [2].

The purpose of adding fibers to the mortar is to delay cracking and reducing the width of cracks. Crack formation is prevented in cases where the induced stress in the mortar, due to shrinkage, is less than the tensile strength of the mortar.

Fibers sew the two edges of cracks, thus preventing their propagation, which results in reduced shrinkage. A research study conducted on this found that adding polypropylene fibers reduced the dry shrinkage of the specimens [3]. The addition of fibers could also have a positive impact on the mechanical properties of cementitious materials; however, in some research studies, it has been demonstrated that the addition of too many fibers could produce defects in the properties of the cementitious materials [4-6]. A great deal of research has been conducted concerning the effect of shrinkage on adhesion. In these studies, it was stated that rupture in multilayer systems is often due to inconsistency between characteristics of the repair layer and substrate [7]. One of the important characteristics is shrinkage, as early shrinkage could result in micro-cracks [8]. Shrinkage between two surfaces causes reduced adhesion between them and the occurrence of rupture at the interface [9, 10].

The current research study is divided into three parts. Part one explores the effect of fibers on shrinkage of the repair mortars. Part two examines the effect of fibers on the bond strength between the repair mortar and concrete substrate with respect to reduced shrinkage in the fiber containing mortars. In the final part, using the semi-destructive methods,

\*Corresponding author’s email: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir



the compressive strength of the repair mortars containing polypropylene fibers is evaluated at different ages.

## 2- Methodology

ASTM C157 [11] and ASTM C490 [12] standards were used to measure the shrinkage of repair mortars, and the value of shrinkage can be measured based on the percentile from relation 1.

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (1)$$

Where, L is the length change of the sample, Li is the initial sample reading minus Reference rod reading, Lx is the sample reading minus Reference rod reading and G is Reference rod length. The ASTM C109 [13] standard was utilized to measure the mortar compressive strength.

The twist-off test was applied to determine shear bond strength. Moreover, in order to evaluate the mortar compressive strength, 150 mm cubic samples were made and a steel cylinder adhered to the surface without core drilling; after which a twisting moment was inserted into the steel cylinder by using Torsion Testing Machine to separate crushed mortar and the cylinder from mortar surface.

## 3- Results and Discussion

Results illustrate the dry shrinkage of repair mortars with and without fibers at different ages. The results indicate that the shrinkage of all mortars starts after leaving the curing practices. Over time, the shrinkage of mortars increases, and the samples cured with curing agents obtain a higher value than the samples cured with water. The process of shrinkage is accelerated because the curing agents are not completely able to prevent the moisture outflow from the mortar, the outflow of free water from mortar and then the outflow of adsorbed water during the week of curing practices. Therefore, the mean 90-day shrinkage of M1 and M2 mortars containing polypropylene fibers was 11.1% and 14.3% lower than mortar without fibers, respectively. It was also observed that shrinkage was very high at an early stage, and the rate of shrinkage decreased over time.

The addition of fiber to the mortars cured with water increased shear bond strength between the repair mortar and concrete substrate to 29.2% and 43.4% at ages of 42 and 90 days, respectively. Moreover, shear bond strength for the samples cured with the curing agents was 34.4% and 51.5% at the ages of 42 and 90 days, respectively. Compared to mortars without fibers, the increase in shear bond strength of mortar with fibers is due to the increased crack width control and fiber shrinkage.

Adding fiber to the mortars cured with water increased the tensile bond strength between the repair mortar and concrete substrate to 19.6% and 41.7% at ages of 42 and 90 days, respectively. Furthermore, tensile bond strength for the

samples cured with the curing agents was 22.7% and 39.1% at the ages of 42 and 90 days, respectively. The improvement in tensile bond strength evident in the mortar with fibers is due to the increased crack width control and fiber shrinkage.

## 4- Conclusion

In conclusion, adding PP fibers to the mortar reduces the dry shrinkage and improves adhesion between the mortar and concrete.

- Given the strong correlation between the results of the twist-off and pull-off tests, it is better to use a simpler and cheaper twist-off test device rather than an expensive pull-off device to determine the bond between the repair mortar and concrete substrate.

- The twist-off and pull-off tests can be used as semi-destructive and functional tests to evaluate the compressive strength of mortars with and without fibers at different ages and in situ.

## References

- [1] A.M. Neville, *Properties of concrete*, fifth ed., Harlow, United Kingdom, 2012.
- [2] M. Naderi, Adhesion of Different Concrete Repair Systems Exposed to Different Environments, *J. Adhesion*. 84 (2008) 78-104. <https://doi.org/10.1080/00218460801888433>.
- [3] L. Lifang, W. Peiming, Y. Xiaojie, Effect of Polypropylene Fiber on Dryshrinkage Ratio of Cement Mortar, *J. Build. Mater.* 8 (2005) 373-377.
- [4] R.A.S. Mohamed, Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete, *J. Eng. Sci.* 34 (2006) 1049-1059.
- [5] D.S. Dharan, A. Lal, Study the effect of polypropylene fiber in concrete, *Int. Res. J. Eng. Tech.* 3 (2016) 616-619.
- [6] S. Vikrant, V. Kavita, S. Kene, N.V. Deshpande, Investigation on Compressive and Tensile Behavior of Fibrillated Polypropylene Fibers Reinforced Concrete, *Int. J. Eng. Res. Appl.* 2 (2012), 1111-1115.
- [7] G.P. Tilly, J. Jacobs, *Concrete repairs: Observations on performance in service and current practice*, Watford, UK, 2007.
- [8] H. Beushausen, M. Alexander, Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage, *Mater. Struct.* 40 (2007) 189-199.
- [9] D. Wu, W. Gao, J. Feng, K. Luo, Structural behaviour evolution of composite steel-concrete curved structure with uncertain creep and shrinkage effects, *Compos. B. Eng.* 2016, 261-272.
- [10] G. Martinola, H. Sadouki, F. Wittmann, Numerical model for minimizing the risk of damage in a repair system, *J. Mater. Civ. Eng.* 13 (2001) 121-129.
- [11] ASTM C157, Test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials, 2008.

[12] 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.

[13] 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.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*A. Saberi Varzaneh, M. Naderi, Using “twist-off” and “pull-off” tests to investigate the effect of polypropylene fibers on the bond of mortar/concrete and to evaluate their in-situ compressive strength, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 335-338.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2021.19711.7240](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19711.7240)







## به کارگیری آزمون‌های پیچش و کشیدن از سطح جهت بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر چسبندگی ملات با بتن و ارزیابی مقاومت فشاری درجای آن‌ها

علی صابری ورزنه\*، محمود نادری

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۵  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

### کلمات کلیدی:

پیچش  
کشیدن از سطح  
چسبندگی  
ملات  
بتن

**خلاصه:** در صنعت تعمیر بتن، چسبندگی بین لایه تعمیر و بستر بتنی، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد مرکب موفق لایه‌های تعمیر دارد. با توجه به پدیده جمع‌شدگی و تاثیر آن بر افت چسبندگی، در این مقاله تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر چسبندگی ملات و بتن مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایشات از آزمون نوین "پیچش" استفاده شد. در تمامی آزمایشات، نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با نتایج آزمون استاندارد "کشیدن از سطح" مورد مقایسه قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج به دست آمده، از آزمون‌های XRD (الگوی پراش اشعه ایکس) و SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) استفاده شد. همچنین تاثیر الیاف بر جمع‌شدگی و مشخصات مکانیکی ملات‌های تعمیر و رابطه آن بر چسبندگی بین ملات و بتن بررسی گردید. در این خصوص از آزمون‌های درجای "پیچش" و "کشیدن از سطح" به صورت آزمایشگاهی استفاده شد. با بررسی ضریب همبستگی بین نتایج آزمون‌های درجا با آزمون‌های آزمایشگاهی، نمودارهای کالیبراسیون جهت تبدیل قرائت‌های به دست آمده از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" به مقاومت فشاری ملات‌ها ارائه شد. نتایج حاصله بیانگر این بود که برای نمونه الیافی، مقدار بیشینه  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  یا هیدروکسید کلسیم دچار کاهش شد که منتج به تولید بیشتر سیلیکات کلسیم هیدراته یا ژل C-S-H می‌شود که نتیجه آن بهبود خواص نهایی ملات و افزایش چسبندگی بود. همچنین به طور میانگین مقاومت چسبندگی برشی و کششی ۹۰ روزه حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" با افزودن الیاف به ترتیب به مقدار ۴۹/۵ و ۴۳/۱ درصد افزایش داشته است.

### ۱- مقدمه

دارد، لذا به محض خروج آب از این منافذ موئینه، باعث از بین رفتن آب جذب سطحی شده و جمع‌شدگی حاصل می‌گردد [۱]. یکی از راه‌کارهای جلوگیری نمودن از خروج رطوبت از داخل ملات، عمل‌آوری مرطوب می‌باشد. در تحقیقی مشخص گردید که چسبندگی بین ملات تعمیر و بستر بتنی تحت عمل‌آوری مرطوب نسبت به حالت رها شده در فضای آزاد حدود ۳/۵ برابر می‌باشد [۲]. اما با توجه به اینکه در عمل، معمولاً زمان عمل‌آوری کمتر از ۱۰ روز می‌باشد و همچنین پدیده جمع‌شدگی در مدت زمان طولانی ادامه دارد لذا می‌بایست راهکاری انتخاب نمود که از ایجاد ترک در داخل ملات حتی بعد از عمل‌آوری نیز جلوگیری نمود. استفاده از الیاف داخل ملات می‌تواند به عنوان یک راه حل مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

هدف از افزودن الیاف، به تاخیر انداختن ترک خوردگی و کاهش عرض ترک‌ها می‌باشد. زمانی می‌توان از ایجاد ترک اجتناب نمود که تنش به وجود آمده در داخل ملات به علت جمع‌شدگی، کمتر از مقاومت کششی ملات باشد. الیاف به نحوی دو طرف ترک‌ها را بهم دوخته و از گسترش

مشکل عمومی مشاهده شده در ارتباط با چسبندگی ضعیف بین ملات تعمیر و بستر بتنی، عامل جمع‌شدگی می‌باشد. علاوه بر تغییر شکل‌های ناشی از اعمال تنش، تغییرات حجمی به وجود آمده به دلیل جمع‌شدگی یا تغییرات دمایی نیز دارای اهمیت می‌باشند زیرا معمولاً در عمل این نوع جابجایی‌ها به طور موضعی یا کامل مهار شده و در نتیجه موجب تنش در داخل ملات می‌گردند. با توجه به اینکه ملات و بتن در کشش بسیار ضعیف بوده و مستعد ترک خوردگی می‌باشند لذا حضور تنش‌های کششی در داخل آن‌ها بسیار زیان‌بار می‌باشد. در کل می‌بایست از این ترک‌ها اجتناب نمود یا به نحوی آن‌ها را کنترل نموده و به حداقل رساند. زیرا به وجود آمدن ترک داخل ملات از عوامل اصلی در کاهش مقاومت چسبندگی بین لایه تعمیر و بستر بتنی می‌باشد. جمع‌شدگی بر اثر خروج رطوبت از ملات سخت شده اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه در منافذ موئینه سیمان هیدراته شده، آب وجود

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir



آن‌ها جلوگیری نموده و در نتیجه باعث کاهش مقدار جمع شدگی می‌گردد. در تحقیقی مشخص گردید که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش مقدار جمع شدگی حاصل از خشک شدگی می‌گردد [۳]. همچنین الیاف می‌تواند در رفتار مکانیکی مصالح سیمانی نیز تاثیر مثبت بگذارد البته در تحقیقاتی مشخص گردید که افزودن بیش از حد الیاف، موجب اثرات زیان‌بار روی مشخصات مصالح سیمانی می‌گردد [۴-۶]. در خصوص تاثیر جمع شدگی بر چسبندگی تحقیقات فراوانی صورت پذیرفته است. در تحقیقی ذکر شده که شکست بین سیستم‌های چند لایه، معمولا ناشی از ناسازگاری بین مشخصه‌های لایه تعمیر و بستر می‌باشد [۷]. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌ها، جمع شدگی می‌باشد به طوری که خشک شدگی زود هنگام، باعث به وجود آمدن ترک‌های ریز ناشی از جمع شدگی می‌گردد [۸]. جمع شدگی به وجود آمده بین دو سطح باعث کاهش چسبندگی بین آن‌ها و رخ دادن شکست بین سطوح مشترک می‌گردد [۹ و ۱۰].

برای به دست آوردن مقدار مقاومت چسبندگی بین دو سطح، روش‌های متفاوتی وجود دارد از جمله آزمون تیر مرکب، صفحه برشی دوبل، تست خمش، آزمون دو نیم شدن، آزمون "کشیدن از سطح" [۱۱] و آزمون برش مایل. البته در تحقیقی در سال ۲۰۱۲ [۱۲] به صورت تئوری و عملی، مشخص گردید که نتایج حاصل از آزمون برش مایل، غیرقابل اعتماد می‌باشد. آزمون دیگر جهت تعیین مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها، می‌توان به آزمون‌های "انتقال اصطکاک" [۱۳-۱۵] اشاره نمود. البته از آزمون "انتقال اصطکاک" جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن [۱۶]، رویه آسفالتی [۱۷] و صخره سنگ [۱۸] نیز می‌توان استفاده نمود.

هنگامی که یک عملیات ترمیمی انجام می‌شود و لایه تعمیر جدید روی بستر بتنی قدیمی اعمال می‌گردد، وجود چسبندگی مناسب بین سیستم تعمیر و لایه بتنی قدیمی بسیار قابل اهمیت می‌باشد. مقاومت چسبندگی معمولا با استفاده از آزمون کشیدن از سطح ارزیابی می‌شود زیرا این آزمون به صورت درجا نیز قابل اعمال است. اما در بیشتر مواقع، تنش برشی به وجود آمده بین دو لایه، دلیل اصلی شکست و کاهش مقاومت چسبندگی است. لذا اندازه گیری مقاومت چسبندگی برشی بین لایه‌ها دارای اهمیت بالایی می‌باشد. با توجه به فقدان روشی درجا و ساده برای اندازه گیری مقاومت چسبندگی برشی بین ملات‌های تعمیر با بستر بتنی لذا استفاده از روش‌های نوین و مقایسه آن با روش‌های استاندارد مورد نیاز می‌باشد.

همچنین برای کاهش مقدار تنش برشی اضافی بین دو لایه که معمولا بر اثر ایجاد جمع شدگی رخ میدهد میبایست تمهیداتی صورت پذیرد. یکی

از این تمهیدات استفاده از انواع مختلف الیاف داخل لایه تعمیر می‌باشد. در تحقیقات اخیر نیز مصالح کامپوزیتی جدید و غیرمعدنی جهت بهبود رفتار و چسبندگی بتن و ملات مورد استفاده قرار گرفته است. پلیمر تقویت شده با الیاف<sup>۱</sup> و ماتریس سیمانی مسلح به الیاف<sup>۲</sup> به دلیل مزایای مثبتی که در مقایسه با مصالح سنتی ارائه می‌دهند، موفقیت‌های زیادی در مقاوم‌سازی و ترمیم المان‌های سازه‌ها کسب نموده‌اند. استفاده‌ی آسان و نسبت مقاومت به وزن بالا، بعضی از عوامل اصلی موفقیت این فناوری‌های نوین است [۱۹]. یک نوع دیگر از این مصالح، پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه<sup>۳</sup> است که به عنوان مثال می‌توان از آنها برای مقاوم سازی ستون‌های سازه‌های بتن مسلح استفاده نمود [۲۰]. گروت مسلح به فولاد<sup>۴</sup> از مصالح تعمیری جدید دیگری می‌باشد که باعث بهبود چسبندگی با سطح بستر بتنی می‌گردد [۲۱]. در تحقیقی دیگر از الیاف مصنوعی و فولادی برای تاثیر آنها بر سطح مشترک بین ملات و بتن استفاده شده است. در تحقیق فوق از روش دو نیم شدن<sup>۵</sup> برای اندازه گیری مقاومت چسبندگی کششی استفاده شده است. نتایج نشانگر بهبود مقاومت کششی دو نیم شدن و انرژی شکست کششی برای نمونه‌های حاوی الیاف می‌باشد [۲۲]. در تحقیقی دیگر روی تاثیر الیاف فولادی و کربنی بر چسبندگی بین ملات و بتن بررسی‌ها انجام شد. در تحقیق فوق مشخص گردید که الیاف باعث افزایش چسبندگی شده و تاثیر الیاف فولادی بیشتر از الیاف کربنی می‌باشد [۲۳]. همانطور که در بندهای بالا ذکر گردید الیاف دارای تاثیر مثبت روی جمع شدگی مصالح سیمانی می‌باشد.

در این تحقیق برای اندازه گیری مقاومت چسبندگی برشی بین ملات‌های تعمیری و بستر بتنی از روش نوین "پیچش" [۲۴] استفاده شد. همچنین برای بهبود رفتار ملات‌ها، کاهش جمع‌شدگی و افزایش چسبندگی از الیاف پلی‌پروپیلن استفاده گردید. علت انتخاب الیاف پلی‌پروپیلن این می‌باشد که در تحقیقات گذشته تاثیر این الیاف بر جمع شدگی ملات‌ها مشخص گردیده اما در خصوص تاثیر آن بر مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و بستر تحقیقات جامعی وجود ندارد. همچنین در این تحقیق در تمامی آزمایشات، از آزمون استاندارد "کشیدن از سطح" نیز استفاده شد و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از آزمون "پیچش" مورد مقایسه قرار گرفت. با انجام آزمایشات و همچنین تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمون‌های XRD (الگوی

- 1 Fiber-reinforced polymer
- 2 Fiber-reinforced cementitious matrix
- 3 Glass fiber-reinforced polymers
- 4 Steel reinforced grout
- 5 Split Tensile Strength



جدول ۱. طرح اختلاط بتن بستر (کیلوگرم بر متر مکعب)

Table 1. substrate concrete mixing design (kg / m<sup>3</sup>)

فوق روان کننده	سیمان	آب	شن	ماسه
۲/۶۱	۵۴۰	۱۹۲/۱	۹۲۹/۱	۸۰۸

جزئی از روی سطح ملات تا داخل بتن بستر ایجاد می‌گردد. سپس استوانه فولادی با استفاده از چسب رزین اپوکسی روی سطح مغزه چسبانده شده و با به کارگیری یک پیچش‌سنج معمولی، لنگر پیچشی به استوانه فولادی وارد می‌گردد تا مغزه از سطح بتن جدا گردد (شکل ۲-الف). همچنین برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها، ابتدا نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری ساخته و سپس بدون انجام کرگیری، استوانه فولادی روی سطح محل آزمون چسبانده شده و مطابق حالت قبل با استفاده از یک پیچش‌سنج به آن لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا ملات دچار شکست شده و استوانه از سطح ملات جدا گردد (شکل ۲-ب).

در آزمون "پیچش" لنگر پیچشی (I) به صورت پیوسته افزایش می‌یابد تا زمانی که شکست رخ دهد. رابطه بین مقاومت برشی و لنگر پیچشی مطابق رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

$$\tau_{E-\max} = \frac{Tr}{J}, J = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau_{E-\max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (1)$$

که در آن J ممان قطبی دوم سطح بوده و I شعاع استوانه فولادی است. لذا با داشتن مقدار لنگر پیچشی، میتوان مقاومت برشی چسبندگی را به دست آورد.

برای تعیین مقاومت کششی چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی از روش "کشیدن از سطح" استفاده گردید [۱۱]. همچنین از این روش برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها نیز بهره گرفته شد (شکل ۳).

جهت اندازه‌گیری مقدار جمع شدگی ملات‌های تعمیری از استانداردهای ASTM C157 [۲۹] و ASTM C490 [۳۰] بهره گرفته شد که مقدار جمع شدگی بر حسب درصد از رابطه ۲ قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

پراش اشعه ایکس) و SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) مشخص گردید که الیاف پلی‌پروپیلن با کاهش مقدار جمع شدگی ملات‌ها و همچنین بهبود رفتار مکانیکی آن‌ها، نقش بسزایی برای جلوگیری از افت چسبندگی بین ملات و بتن در سنین بالا دارد. در کل این تحقیق به سه قسمت تقسیم شده است. ابتدا بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر چسبندگی بین ملات و بتن. سپس تجزیه و تحلیل افزایش چسبندگی با بررسی تاثیر الیاف بر جمع شدگی و مشخصات شیمیایی و فیزیکی ملات. در انتها نیز تعیین مشخصات مکانیکی ملات‌های مسلح به الیاف با به کارگیری آزمون‌های درجا.

## ۲- کارهای آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

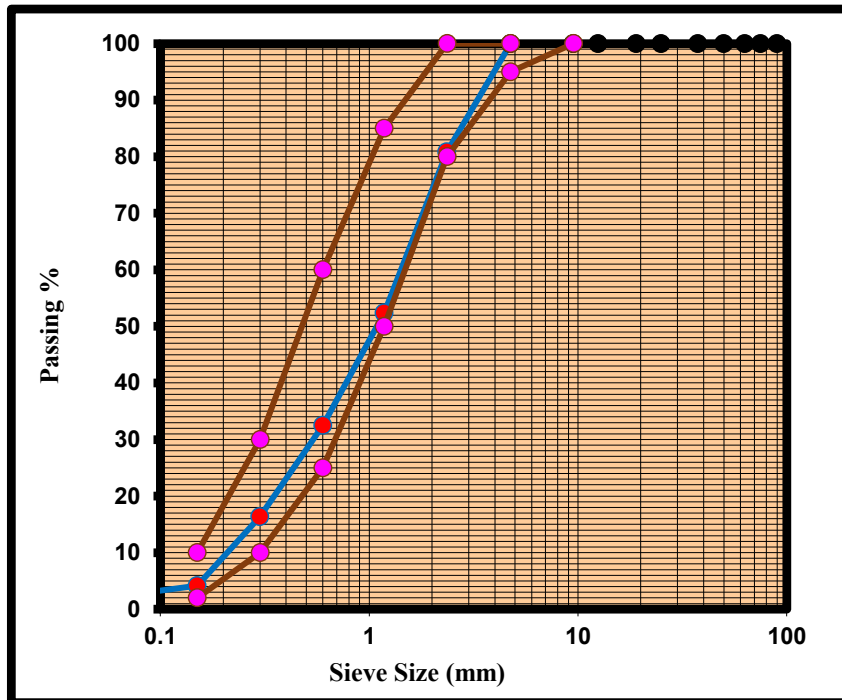
سیمان استفاده شده برای ساخت ملات و بتن بستر از نوع تیپ ۲ با چگالی ۳۰۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. سنگدانه‌های شن و ماسه دارای چگالی در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و حداکثر اندازه آن‌ها نیز به ترتیب برابر ۱۹ و ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. جذب آب شن و ماسه بر اساس استانداردهای ASTM C128 [۲۵] و ASTM C127 [۲۶] برابر ۲/۶ و ۳/۲ درصد به دست آمد. الیاف از نوع پلی‌پروپیلن مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق با توجه به کتاب راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن [۲۷]، الیاف به میزان ۰/۳ درصد حجم ملات مورد مصرف قرار گرفت. همچنین مواد عمل‌آورنده از نوع پلی‌اولفین برای عمل‌آوری برخی نمونه‌ها استفاده شد. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

ملات ماسه سیمان ترکیبی از سیمان، ماسه و آب به نسبت‌های مختلف است [۲۸]. از دو نوع ملات تعمیری پایه سیمانی با نسبت وزنی سیمان، ماسه و آب برابر ۰/۵ : ۳ : ۱ (M1) و ۰/۵ : ۲ : ۱ (M2) استفاده گردید. طرح اختلاط بتن بستر نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

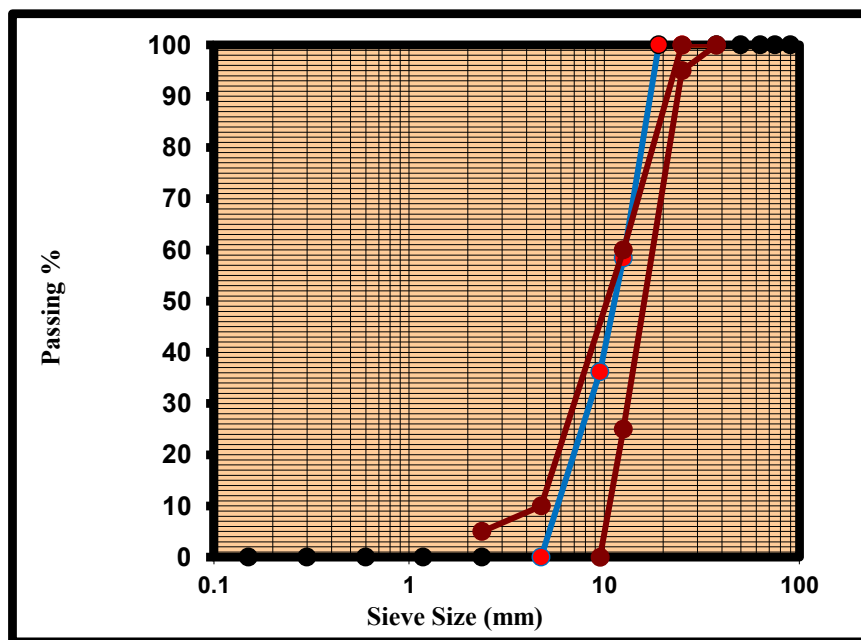
به علت ثابت نبودن رطوبت سنگدانه‌ها در فضای آزاد، ابتدا شن و ماسه به مدت هفتاد و دو ساعت در فضای آزمایشگاه قرار گرفتند. سپس همان‌طور که ذکر شد میزان جذب آب آن‌ها برای رسیدن به حالت اشباع محاسبه گردید و سپس به آب اختلاط افزوده شد.

### ۲-۲- روش‌های آزمایشگاهی

جهت تعیین مقاومت چسبندگی برشی نیز از آزمون "پیچش" استفاده شد [۲۴]. در آزمون "پیچش" ابتدا با استفاده از دستگاه کرگیری یک مغزه



الف) دانه بندی شن



ب) دانه بندی ماسه

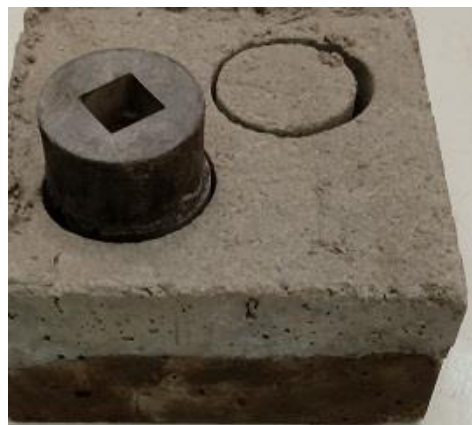
شکل ۱. دانه بندی سنگدانه های مصرفی

Fig. 1. Granulation of used aggregates





ب) ارزیابی مقاومت فشاری ملات تعمیری



الف) تعیین مقاومت برشی چسبندگی

شکل ۲. انجام آزمون "پیچش"

Fig. 2. Perform "twist-off" test



ب) ارزیابی مقاومت فشاری ملات تعمیری



الف) تعیین مقاومت کششی چسبندگی

شکل ۳. انجام آزمون "کشیدن از سطح"

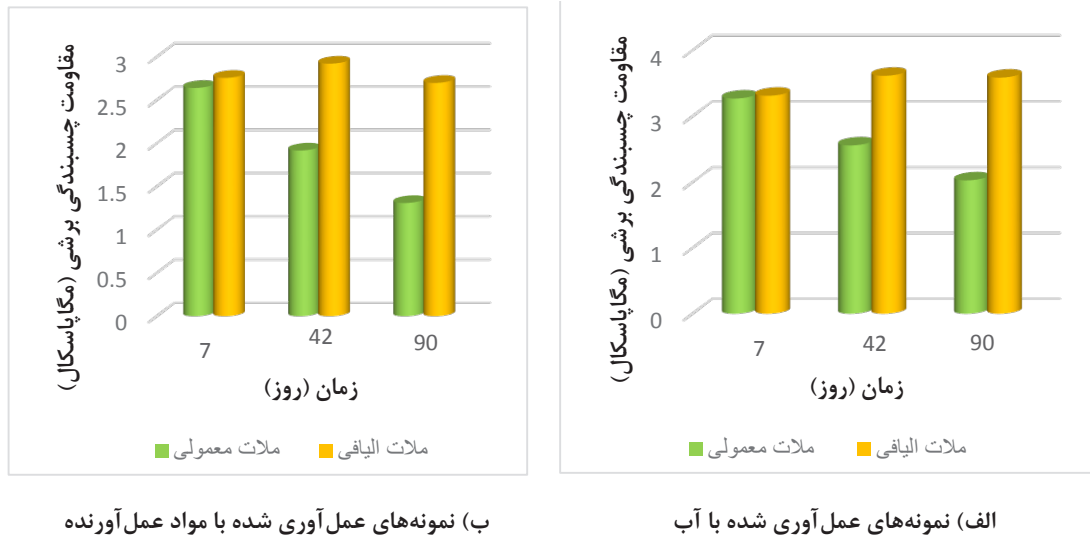
Fig. 3. Perform "pull-off" test

۲-۳- ساخت نمونه‌ها

برای تعیین چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی، ابتدا نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری به عنوان بتن بستر ساخته شد و سپس با استفاده از دستگاه برش، نمونه‌ها به سه قسمت با سطح مقطع مربع ۱۵۰ میلی‌متری و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تقسیم شدند. قبل از اعمال ملات‌های تعمیری روی سطح بتن بستر، دوغاب آب و سیمان نسبتاً سفت روی سطح بستر اعمال گردید و قبل از خشک شدن آن، ملات تعمیری روی سطح بستر اعمال گردید. نمونه‌ها به مدت هفت روز در دو حالت عمل‌آوری داخل آب و با

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (2)$$

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  $G$  طول میله مرجع می‌باشد. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات‌ها نیز از استاندارد ASTM C109 [۳۱] استفاده گردید که متوسط ۶ نمونه مکعبی ۵۰ میلی‌متری برای هر نمونه باید اندازه‌گیری شود.



شکل ۴. نتایج حاصل از آزمون "پیچش" برای ملات M1

Fig. 4. Results of "twist-off" test for M1 mortar

که نمونه‌ها تازه از عمل‌آوری خارج گردیده‌اند، تفاوت چندانی بین چسبندگی آن‌ها وجود ندارد. در ملات‌های عمل‌آوری شده در آب، افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری و بستر بتنی در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۲/۲۹ و ۴/۴۳ درصد گردیده است. همچنین افزایش مقاومت چسبندگی برشی برای نمونه‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده در سنین ۴۲ و ۹۰ روز برابر است با ۴/۳۴ و ۵/۵۱ درصد. علت افزایش مقاومت چسبندگی برشی ملات حاوی الیاف در مقایسه با ملات بدون الیاف، به دلیل کنترل افزایش عرض ترک‌ها و مقدار جمع‌شدگی توسط الیاف می‌باشد.

در شکل ۵ نتایج حاصل از آزمون "پیچش" جهت تعیین مقاومت چسبندگی برشی برای ملات M2 نشان داده شده است.

مطابق شکل ۵، در این ملات نیز مانند ملات M1، مشاهده می‌گردد که افزودن الیاف به ملات باعث افزایش چشمگیر مقاومت چسبندگی شده است. در مقایسه ملات‌های حاوی الیاف و بدون الیاف مشاهده می‌شود که مقاومت چسبندگی برشی نمونه‌های حاوی الیاف و عمل‌آوری شده در آب برای سنین ۴۲ و ۹۰ روز به مقدار ۱/۳۲ و ۶/۴۸ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد. همچنین برای نمونه‌های عمل‌آوری در مواد عمل‌آورنده نیز مشاهده می‌شود که مقاومت برشی چسبندگی نمونه‌های حاوی الیاف در سنین ۴۲ و ۹۰ روز به مقدار ۲/۴۲ و ۴/۵۴ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد.

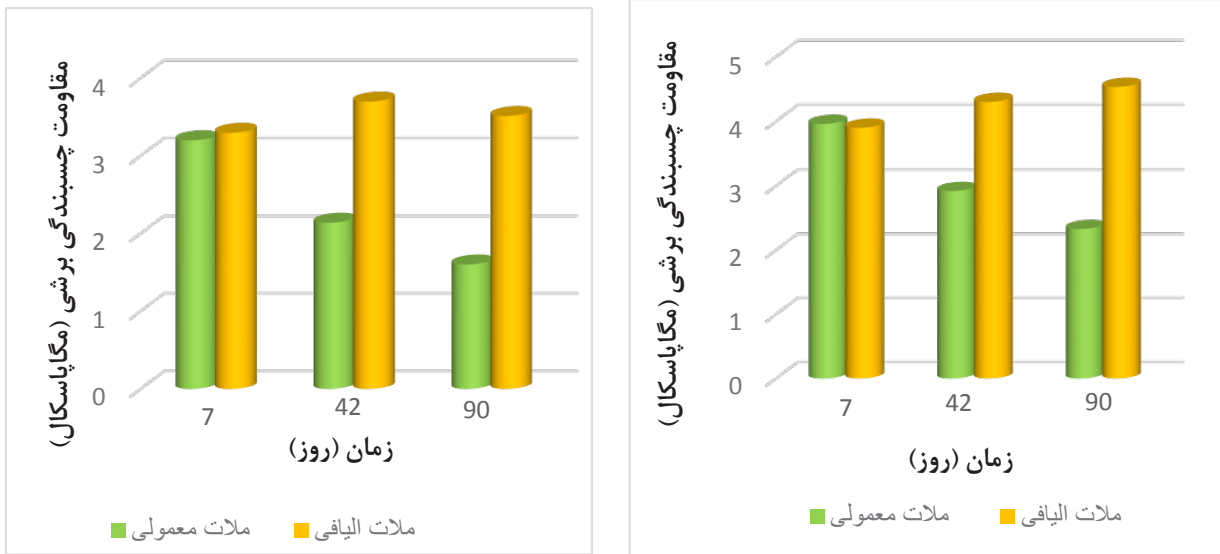
مواد عمل‌آورنده قرار گرفتند، سپس از عمل‌آوری خارج و در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین جهت ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها با روش‌های درج‌ای نیمه مخرب "پیچش" و "کشیدن از سطح"، همزمان نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری ملات ساخته شد و در عمل‌آوری قرار گرفته و در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز از عمل‌آوری خارج و مورد آزمایش قرار گرفتند.

### ۳- نتایج به دست آمده و تحلیل آن‌ها

#### ۳-۱- مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون "پیچش"

در شکل ۴ نتایج حاصل از آزمون "پیچش" جهت تعیین مقاومت چسبندگی برشی برای ملات M1 نشان داده شده است.

از مقایسه شکل‌های الف و ب مشاهده می‌شود که مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری و بستر بتنی برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده می‌باشند که دلیل آن ناشی از جمع‌شدگی کمتر نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌باشد که منتج به بروز ترک‌های کمتر در ملات می‌گردد. در هر دو عمل‌آوری مشاهده می‌شود که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ملات باعث افزایش چشمگیر مقاومت چسبندگی لایه تعمیری با بستر بتنی شده است. البته در سن ۷ روز



شکل ۵. نتایج حاصل از آزمون "پیچش" برای ملات M2

Fig. 5. Results of "twist-off" test for M2 mortar

است. در مقایسه ملات‌های حاوی الیاف و بدون الیاف مشاهده می‌شود که مقاومت چسبندگی کششی نمونه‌های حاوی الیاف و عمل‌آوری شده در آب برای سنین ۴۲ و ۹۰ روز به مقدار ۲۹ و ۴۶/۷ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد. همچنین برای نمونه‌های عمل‌آوری در مواد عمل‌آورنده نیز مشاهده می‌شود که مقاومت کششی چسبندگی نمونه‌های حاوی الیاف در سنین ۴۲ و ۹۰ روز به مقدار ۳۰/۶ و ۴۴/۹ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد.

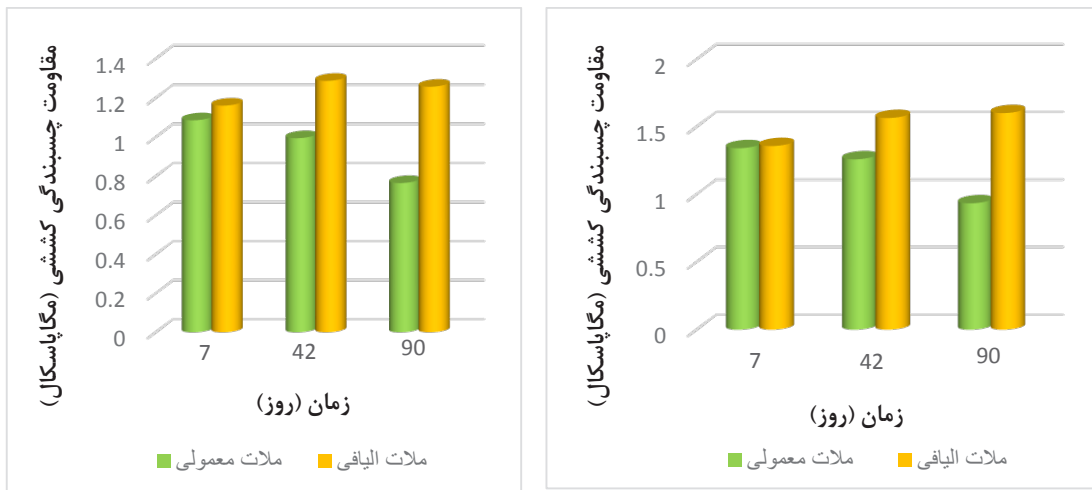
در کل با توجه به شکل‌های ۴ تا ۷ مشاهده شد که افزودن الیاف به ملات، دارای تاثیر چشمگیر در مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی بوده است و باعث بهبود آن شده است. همچنین در مقایسه ملات‌ها با عمل‌آوری‌های متفاوت، مشاهده شد که مقاومت چسبندگی ملات‌های عمل‌آوری شده در آب، بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی، اکثر شکست‌ها به طور کامل در سطح مشترک بین ملات تعمیری و بستر بتنی رخ داد و فقط در تعداد بسیار محدودی از نمونه‌ها، شکست به صورت ترکیبی اتفاق افتاده و به طور کامل در مرز بین سطوح رخ نداده است. لذا تاثیر چندانی در نتایج حاصله نداشته و قابل چشم پوشی می‌باشد.

۳-۲- مقاومت چسبندگی کششی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" در شکل ۶ نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" جهت تعیین مقاومت چسبندگی کششی برای ملات M1 نشان داده شده است.

در هر دو عمل‌آوری مشاهده می‌شود که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ملات باعث افزایش چشمگیر مقاومت چسبندگی لایه تعمیری با بستر بتنی شده است. البته در سن ۷ روز که نمونه‌ها تازه از عمل‌آوری خارج گردیده‌اند، تفاوت چندانی بین چسبندگی آن‌ها وجود ندارد. در ملات‌های عمل‌آوری شده در آب، افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی در سنین ۴۲ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۱۹/۶ و ۴۱/۷ درصد گردیده است. همچنین افزایش مقاومت چسبندگی کششی برای نمونه‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده در سنین ۴۲ و ۹۰ روز برابر است با ۲۲/۷ و ۳۹/۱ درصد. علت افزایش مقاومت چسبندگی کششی ملات حاوی الیاف در مقایسه با ملات بدون الیاف، به دلیل کنترل افزایش عرض ترک‌ها و مقدار جمع‌شدگی توسط الیاف می‌باشد.

در شکل ۷ نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" جهت تعیین مقاومت چسبندگی کششی برای ملات M2 نشان داده شده است.

مطابق شکل ۷، در این ملات نیز مانند ملات M1، مشاهده می‌گردد که افزودن الیاف به ملات باعث افزایش چشمگیر مقاومت چسبندگی شده

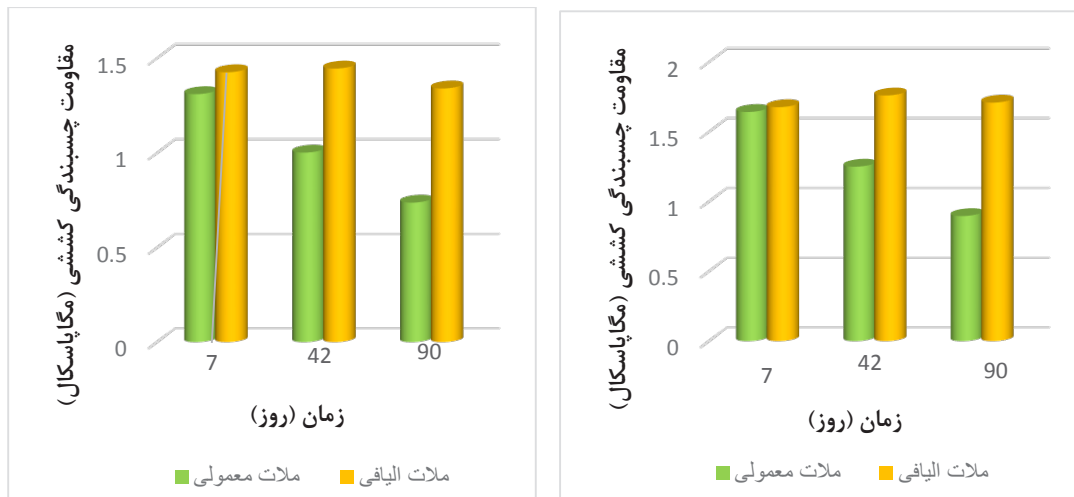


ب) نمونه‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده

الف) نمونه‌های عمل‌آوری شده با آب

شکل ۶. نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" برای ملات M1

Fig. 6. Results of "pull-off" test for M1 mortar

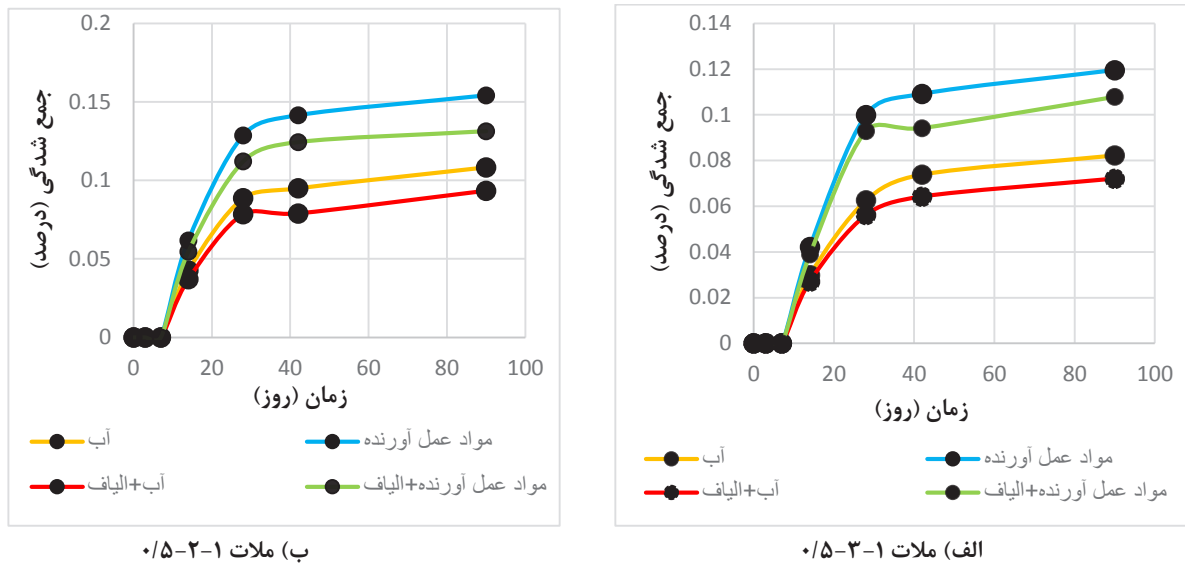


ب) نمونه‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده

الف) نمونه‌های عمل‌آوری شده با آب

شکل ۷. نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" برای ملات M2

Fig. 7. Results of "pull-off" test for M2 mortar



شکل ۸. نمودار جمع شدگی ملات‌های مسلح به الیاف

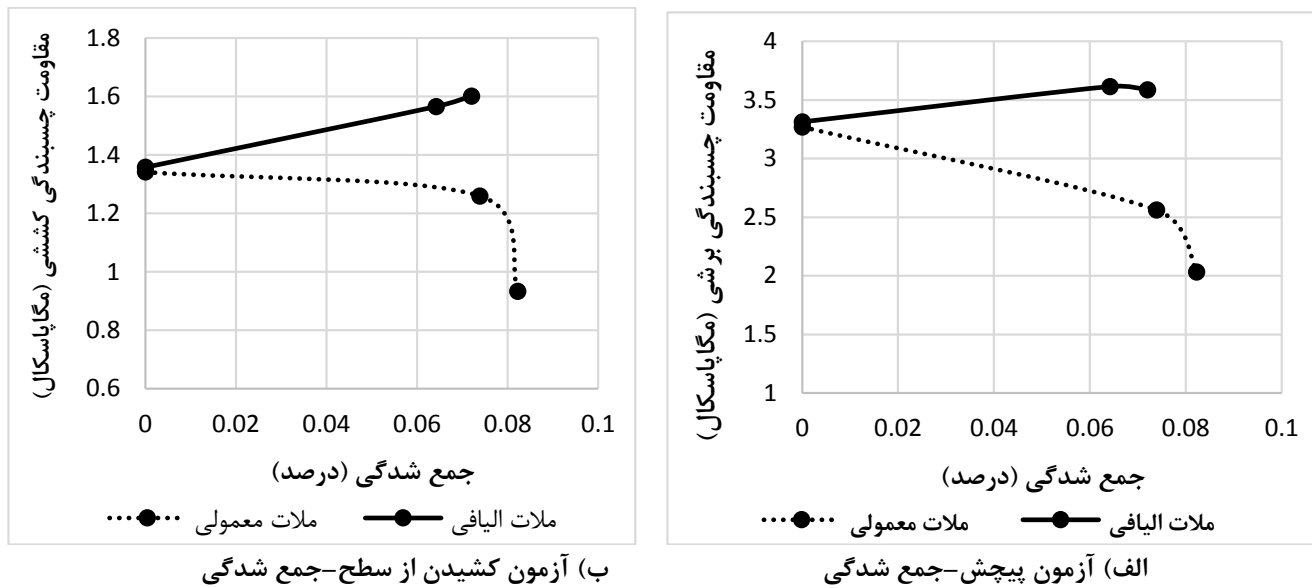
Fig. 8. Shrinkage diagram of fiber reinforced mortars

### ۳-۳- تاثیر جمع شدگی بر چسبندگی

یکی از عوامل اصلی موثر روی چسبندگی، جمع شدگی می‌باشد. لذا در این قسمت ابتدا تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر جمع شدگی ملات‌های تعمیری نشان داده شده است و سپس رابطه جمع شدگی ملات‌های تعمیری مسلح به الیاف و مقاومت چسبندگی ارائه شده است. در شکل ۸ نتایج حاصل از جمع شدگی ملات‌های تعمیری نشان داده شده است.

از شکل ۸-الف مشاهده می‌شود مقدار جمع شدگی ۹۰ روزه برای ملات ۱-۳-۵/۰، بدون الیاف و تحت عمل‌آوری داخل آب و مواد عمل‌آورنده به ترتیب برابر ۰/۰۸۲۲ و ۰/۱۱۹۵ درصد به دست آمده است. برای همین ملات با افزودن الیاف، مقدار جمع شدگی ۹۰ روزه در عمل‌آوری‌های ذکر شده برابر ۰/۰۷۲۰ و ۰/۱۰۷۹ درصد شد. به عبارتی افزودن الیاف به ملات ۱-۳-۵/۰، میزان جمع شدگی ۹۰ روزه را به طور متوسط به مقدار ۱۱/۱ درصد کاهش داده است. مطابق با شکل ۸-ب مقدار کاهش جمع شدگی ۹۰ روزه برای ملات ۱-۲-۵/۰ با افزودن الیاف به طور متوسط برابر ۱۴/۳ درصد شده است. از مقایسه مقادیر جمع شدگی دو نوع ملات ذکر شده، مشاهده می‌شود که مقدار جمع شدگی ملات ۱-۳-۵/۰ از ملات ۱-۲-۵/۰ کمتر می‌باشد. علت این موضوع به دلیل وجود سنگدانه بیشتر در ملات ۱-۳-۵/۰ می‌باشد. اندازه ذرات و دانه‌بندی سنگدانه به خودی خود تاثیر چندانی بر مقدار جمع شدگی

ندارند اما استفاده از دانه‌های بیشتر، امکان به کار بردن مخلوط‌های با سیمان کمتر را فراهم می‌آورد و در نتیجه از جمع شدگی کاسته می‌شود [۱]. جمع شدگی ملات‌های عمل‌آوری شده با مواد عمل‌آورنده بیشتر از جمع شدگی ملات‌ها تحت عمل‌آوری در آب می‌باشد. با مقایسه جمع شدگی ملات‌ها در عمل‌آوری‌های مختلف مشاهده می‌شود که جمع شدگی ملات‌های عمل‌آوری شده در آب به طور میانگین ۳۱ درصد کمتر می‌باشد. توجه به اینکه سیمان هیدراته شده، حاوی منافذ موئینه می‌باشد لذا داخل این منافذ، آب وجود دارد. البته از دست رفتن آب داخل منافذ باعث جمع شدگی نمی‌شود اما به محض اینکه آب منافذ موئینه از دست می‌رود، باعث از بین رفتن آبی که جذب سطحی شده می‌گردد و جمع شدگی حاصل می‌شود. با توجه به اینکه مواد عمل‌آورنده، به طور کامل از خروج رطوبت داخل ملات جلوگیری نمی‌نمایند لذا همین موضوع سبب افزایش جمع شدگی ملات‌ها در عمل‌آوری با مواد عمل‌آورنده نسبت به عمل‌آوری در آب می‌گردد. همچنین با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که اکثر جمع شدگی تا سن ۴۲ روز اتفاق افتاده و پس از آن شیب نمودار جمع شدگی در حال کاهش می‌باشد. در تحقیق مشابه دیگری ذکر شده است که بخش اعظم مقدار جمع شدگی حاصل از خشک شدگی، تا سن ۴۲ روزگی به وقوع می‌پیوندد و پس از سن ۹۰ روزگی، جمع شدگی کاهش چشمگیری می‌یابد [۳۲].



شکل ۹. رابطه جمع شدگی ملات با چسبندگی

Fig. 9. Relationship between mortar shrinkage and adhesion

ملات‌ها، از عکس‌برداری و آنالیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد (شکل ۱۰).

همانطور که از شکل ۱۰-الف مشاهده می‌گردد خمیر هیدراته شده در حال تشکیل شدن می‌باشد که در شکل مذکور بلورهای بزرگ مجزا با فرم منشوری چند وجهی نمایانگر هیدروکسید کلسیم یا پرتلندایت می‌باشد. اما یک سری فضاهای خالی در ملات مشاهده می‌گردد که به علت عدم تکمیل نشدن فرآیند هیدراسیون سیمان به صورت کامل است که می‌تواند تاثیر به سزایی در کاهش مقاومت ملات بگذارد. مطابق شکل ۱۰-ب با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ملات، مشاهده می‌شود که فرآیند هیدراسیون سیمان و تشکیل ژل سیلیکاتی C-S-H در کنار الیاف پلی‌پروپیلن به خوبی انجام شده و باعث یکنواختی بهتر ترکیب ملات گردیده است. به عبارتی افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث پیوستگی بهتر ملات گردیده است.

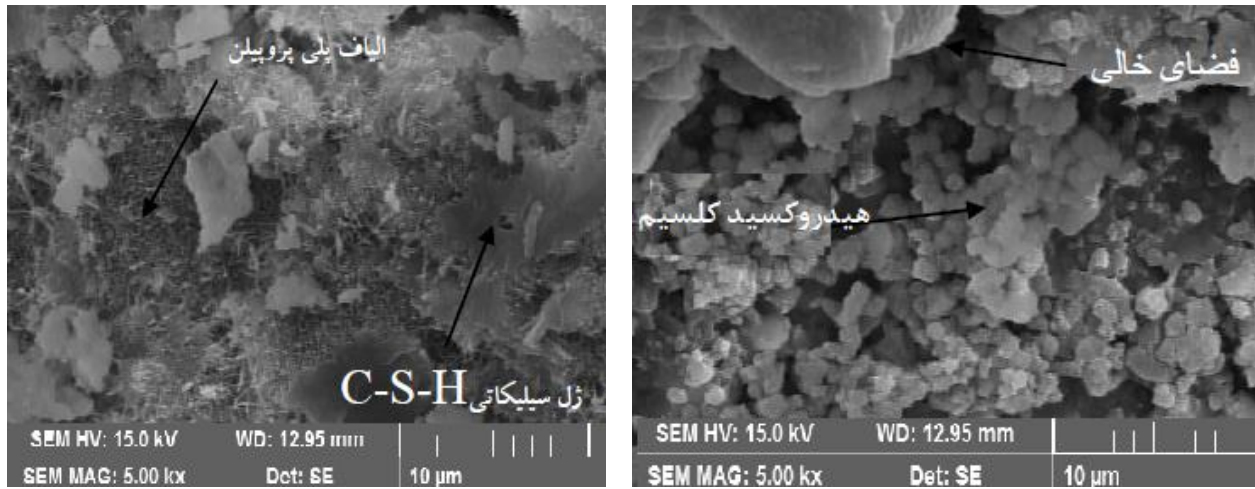
جهت بررسی دقیق‌تر فازها و ساختار کریستالوگرافی ذرات موجود در ملات قبل و پس از افزودن الیاف، از این نمونه‌ها آزمون XRD به عمل آمد و نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزودن الیاف، مقدار بیشینه  $\text{Ca(OH)}_2$  یا هیدروکسید کلسیم که با فلش مشکی رنگ نشان داده شده است، دچار کاهش شده است. با توجه

در شکل ۹ رابطه بین مقاومت چسبندگی و جمع شدگی ملات‌های مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۹ مشاهده می‌گردد رابطه عکس بین مقاومت چسبندگی با جمع شدگی ملات‌های تعمیری بدون الیاف وجود دارد به گونه‌ای که افزایش جمع شدگی ملات‌های بدون الیاف باعث کاهش چسبندگی بین ملات و بتن بستر شده است. به عنوان مثال با مقایسه مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون پیچش برای سنین ۹۰ و ۷ روز مشاهده می‌شود که جمع شدگی باعث کاهش مقاومت چسبندگی به میزان  $37/9\%$  درصد گردیده است. اما مطابق شکل ۹، افزودن الیاف علاوه بر کاهش جمع شدگی، از افت چسبندگی نیز جلوگیری نموده است. به عنوان مثال جمع شدگی ملات بدون الیاف در سن ۹۰ روز برابر  $0/082\%$  درصد می‌باشد اما جمع شدگی ملات مسلح به الیاف برای همین سن برابر  $0/072\%$  درصد شده است. با کاهش مقدار جمع شدگی، ملاحظه می‌گردد که مقاومت چسبندگی برشی ۹۰ روزه بین ملات معمولی و بتن حاصل از آزمون پیچش برابر  $2/03$  مگاپاسکال می‌باشد در صورتی که با افزودن الیاف، مقاومت چسبندگی برشی متناظر برابر  $3/59$  مگاپاسکال گردیده است.

برای تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر ملات‌ها و بررسی ساختار میکروسکوپی



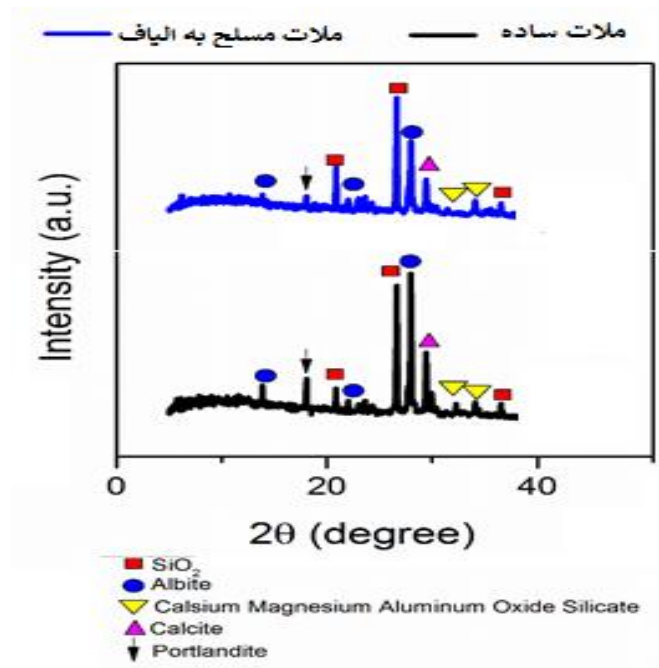


ب) ملات مسلح به الیاف

الف) ملات بدون الیاف

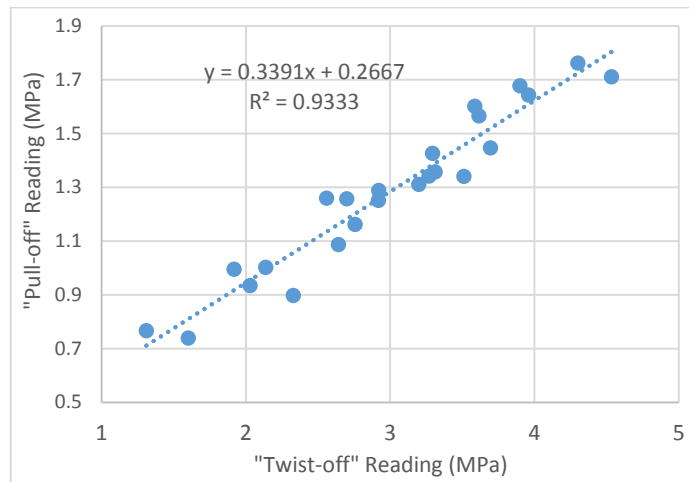
شکل ۱۰. عکس‌های SEM از ملات‌ها

Fig. 10. SEM photos of mortars



شکل ۱۱. الگوی پراش اشعه ایکس برای ملات مسلح به الیاف

Fig. 11. X-ray diffraction pattern for fiber reinforced mortar



شکل ۱۲. همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح"

Fig. 12. Correlation between the results of the "twist-off" and "pull-off" tests

سه خوانش می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲ ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین نتایج حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" به ترتیب برابر ۰/۹۶ و ۰/۹۳ می‌باشد. با توجه به همبستگی بالا بین نتایج حاصل از روش‌های فوق، می‌توان به آسانی از نتایج یکی، نتایج معادل دیگری را به دست آورد. همچنین با عنایت به سادگی و ارزانی دستگاه آزمون "پیچش" می‌توان برای تعیین چسبندگی بین ملات تعمیر و بستر بتنی، روش "پیچش" را جایگزین روش "کشیدن از سطح" نمود که تجهیزات آن دارای قیمت گزاف و نیاز به کالیبراسیون متداوم دارد.

### ۳-۵- ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها توسط آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح"

مقدار مشخصی از الیاف، باعث افزایش طاقت مصالح در برابر تنش‌های وارده می‌گردد که این امر به وسیله به تاخیر انداختن ترک خوردگی و همچنین انتقال تنش‌های وارده در عرض مسیر ترک‌ها می‌باشد به گونه‌ای که این امکان را برای ملات فراهم می‌آورد تا بتواند تغییر شکل‌های بسیار بزرگ‌تری را تحت تنش‌های اوج تحمل نماید. در جدول شماره ۲ مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که افزودن ۰/۳ درصد حجمی الیاف باعث بهبود مقاومت فشاری ملات‌ها در سنین مختلف شده است. برای ملات ۱-۲-۴/۰، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طور میانگین باعث افزایش

به اینکه محصولات واکنش هیدراسیون برابر سیلیکات کلسیم هیدراته و هیدروکسید کلسیم می‌باشد لذا با کاهش هیدروکسید کلسیم، نتیجه می‌شود که مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته (ژل C-S-H) افزایش یافته است. افزایش سیلیکات کلسیم هیدراته طی فرآیند هیدراسیون می‌تواند خواص نهایی ملات را تحت تاثیر قرار داده و باعث افزایش مقاومت ملات گردد.

### ۳-۴- همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح"

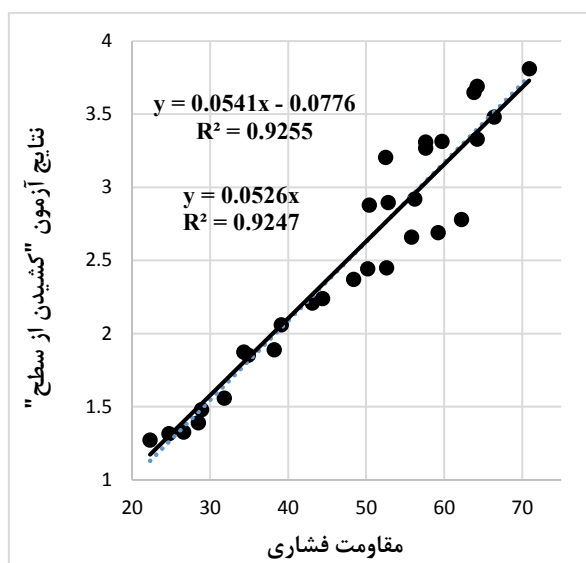
با مقایسه اشکال ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود که مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون "پیچش" به طور میانگین ۲/۳۱ برابر مقاومت چسبندگی کششی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" گردیده است. در یک تحقیق دیگر نیز ذکر شده که همواره مقاومت چسبندگی برشی بیشتر از مقاومت کششی چسبندگی بین ملات تعمیر و بستر بتنی می‌باشد. در تحقیق فوق، نسبت مقاومت چسبندگی برشی به مقاومت چسبندگی کششی به طور میانگین برابر ۲/۲ می‌باشد [۳۳]. همچنین در تحقیقی دیگر گفته شده که نسبت مقاومت چسبندگی برشی به مقاومت چسبندگی کششی بیشتر از ۱/۹ می‌باشد که مشاهده می‌شود در این تحقیق برابر ۲/۳۱ به دست آمده است [۳۴].

در شکل ۱۲ شدت همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" قابل مشاهده می‌باشد. در این شکل هر نقطه، متوسط

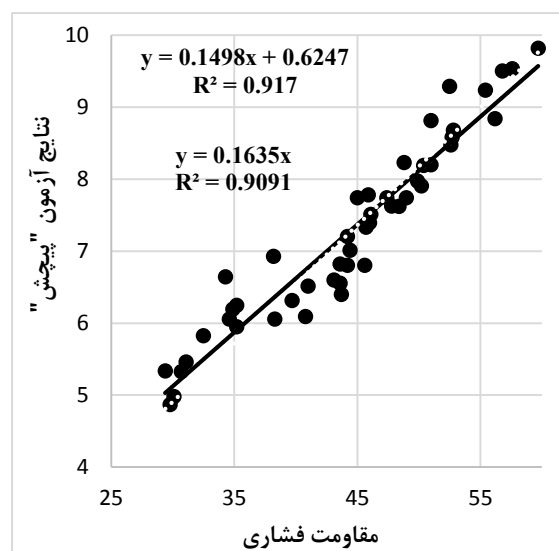
جدول ۲. مقاومت فشاری ملات‌ها (مگاپاسکال)

Table 2. Compressive strength of mortars (MPa)

نوع ملات	روز ۳	روز ۷	روز ۲۸	روز ۴۲	روز ۹۰
بدون الیاف	۲۳/۳	۳۴/۱	۴۷/۶	۵۱/۲	۵۴/۴
مسلح به الیاف	۲۴/۵	۳۵/۸	۵۰/۴	۵۳/۱	۵۶/۶



(ب) "کشیدن از سطح" - مقاومت فشاری



(الف) "پیچش" - مقاومت فشاری

شکل ۱۳. همبستگی بین نتایج آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" با مقاومت فشاری ملات‌ها (مگاپاسکال)

Fig. 13. Correlation between the results of "twist-off" and "pull-off" tests with the compressive strength of mortars (MPa)

فشاری ملات‌ها با استفاده از رگرسیون خطی مشخص گردیده و در ادامه با توجه به فرضیه تحقیق، در خصوص این که "نمودار رگرسیون می‌بایست از محور مختصات عبور کرده باشد و معادله کالیبراسیون آن به صورت  $y=ax$  انتخاب گردد و سپس تحلیل رگرسیون انجام شود"، در نتیجه ضریب تعیین در این حالت نیز به دست آمده و در انتها اگر اختلافی بین ضرایب تعیین در دو حالت وجود داشته باشد، می‌توان از تحلیل‌های رگرسیون به صورت توانی استفاده نمود.

در شکل ۱۳ رابطه نتایج حاصل از آزمون‌های درجا با مقاومت فشاری ملات‌های مسلح به الیاف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۳-الف

مقاومت فشاری ملات‌ها به مقدار ۳/۷ درصد شده است. افزایش مقاومت فشاری برای ملات ۱-۲-۵/۰ با افزودن الیاف به طور میانگین برابر ۴/۸ درصد شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که ملات ۱-۲-۴/۰ دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به ملات ۱-۲-۵/۰ می‌باشد که دلیل آن به علت پایین‌تر بودن نسبت آب به سیمان در ملات ۱-۲-۴/۰ می‌باشد.

در این قسمت همبستگی بین قرائت‌های به دست آمده از انجام آزمون‌های درجا با مقاومت فشاری ملات‌های مسلح به الیاف ارائه شده است. در این ارتباط از تحلیل‌های آماری رگرسیون استفاده شده است. ابتدا ضریب تعیین و شدت همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون‌های درجا و مقاومت

۱۵ درصد شد و همچنین باعث افزایش مقدار چسبندگی به بیش از ۴۰ درصد گردید.

- به طور میانگین مقاومت چسبندگی برشی و کششی ۹۰ روزه حاصل از آزمون های "پیچش" و "کشیدن از سطح" با افزودن الیاف به ترتیب به مقدار ۴۹/۵ و ۴۳/۱ درصد افزایش داشت.

- با تحلیل عکس‌های SEM و XRD مشاهده شد که الیاف PP علاوه بر کاهش جمع شدگی، با کاهش مقدار بیشینه هیدروکسید کلسیم  $(Ca(OH)_2)$  سبب افزایش تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H) و باعث بهبود مشخصات مکانیکی ملات و چسبندگی آن به بستر شد.

- با توجه به همبستگی بالا بین نتایج حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح"، پیشنهاد می‌گردد جهت تعیین چسبندگی بین ملات تعمیری و بستر بتنی به جای استفاده از دستگاه گران قیمت "کشیدن از سطح"، از دستگاه ساده و ارزان "پیچش" استفاده نمود.

- برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌های با و بدون الیاف در سنین مختلف و به صورت درجا، می‌توان از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" به عنوان یک آزمون نیمه مخرب و کاربردی استفاده نمود. معادلات پیشنهادی جهت تبدیل نتایج حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" به مقاومت فشاری ملات‌ها به ترتیب برابر است با  $y = 0.163x$  و  $y = 0.053x$ .

#### منابع

- [1] A.M. Neville, Properties of concrete, 5 Edition, Harlow, United Kingdom, (2012), p.872.
- [2] M. Naderi, Adhesion of Different Concrete Repair Systems Exposed to Different Environments Journal of Adhesion, 84(1) (2008), 78-104.
- [3] L. Lifang, W. Peiming, Y. Xiaojie, Effect of Polypropylene Fiber on Dryshrinkage Ratio of Cement Mortar, Journal of Building Materials. 8(4) (2005), 373-377.
- [4] R.A.S. Mohamed, Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete, Journal of Engineering Science, 34(4) (2006), 1049-1059.
- [5] D.S. Dharan, A. Lal, Study the effect of polypropylene fiber in concrete, International Research Journal of Engineering and Technology, 3(6) (2016), 616-619.

مشاهده می‌شود که با انجام رگرسیون خطی، ضریب تعیین بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن برابر ۰/۹۱۷ و شدت همبستگی برابر ۰/۹۵۷ می‌باشد. اما اگر معادله رگرسیون در حالت خطی به صورت  $y=ax$  انتخاب گردد و تحلیل همبستگی مجدد صورت پذیرد مشاهده می‌شود که ضریب تعیین برابر ۰/۹۰۹ می‌گردد که با توجه به اختلاف ناچیز بین ضرایب تعیین به دست آمده، لذا می‌توان با به کارگیری آزمون "پیچش"، نتایج حاصل از این آزمون را با استفاده از منحنی کالیبراسیون خطی شکل ۱۳-الف با معادله  $y = 0.163x$  و در محدوده اطمینان بالا، مقدار مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را اندازه‌گیری نمود.

با توجه به شکل ۱۳-ب مشاهده می‌شود که با انجام رگرسیون خطی، ضریب تعیین بین نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" و مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن برابر ۰/۹۲۵ و شدت همبستگی برابر ۰/۹۶۲ می‌باشد. اما اگر معادله رگرسیون در حالت خطی به صورت  $y=ax$  انتخاب گردد و تحلیل همبستگی مجدد صورت پذیرد مشاهده می‌شود که ضریب تعیین برابر ۰/۹۲۴ می‌گردد که با توجه به اختلاف ناچیز بین ضرایب تعیین به دست آمده، لذا می‌توان با به کارگیری آزمون "کشیدن از سطح"، نتایج حاصل از این آزمون را با استفاده از منحنی کالیبراسیون خطی شکل ۱۳-ب با معادله  $y = 0.053x$  و در محدوده اطمینان بالا، مقدار مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را اندازه‌گیری نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر چسبندگی بین ملات و بتن مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایشات از آزمون نوین «پیچش» استفاده شد. در تمامی آزمایشات، نتایج حاصل از آزمون «پیچش» با نتایج به دست آمده از آزمون استاندارد «کشیدن از سطح» مورد مقایسه قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج به دست آمده، از آزمون‌های XRD (الگوی پراش اشعه ایکس) و SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) استفاده شد. همچنین تاثیر الیاف بر جمع شدگی و مشخصات مکانیکی ملات‌های تعمیری و رابطه آن بر چسبندگی بین ملات و بتن بررسی گردید. نتایج حاصله در ادامه ذکر شده است.

- الیاف پلی‌پروپیلن با کاهش مقدار جمع شدگی ملات‌ها، تاثیر فراوانی برای جلوگیری از افت چسبندگی در سنین بالا داشت. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ملات‌های تعمیری باعث کاهش جمع شدگی به مقدار حدود

- Basic Applied Science, 7(2) (2013), 438-447.
- [17] M. Naderi, Evaluating in situ shear strength of bituminous pavements, In Proceedings of the institution of Civil Engineering, 4 (2006), 61-65.
- [18] M. Naderi, An alternative method for in situ determination of rock strength, Canadian Geotechnical Journal, 48 (2011), 1901-1905.
- [19] M. Santandrea, I.A.O. Imohamed, H. Jahangir, C. Carloni, C. Mazzotti, S. Miranda, P. Casadei, An investigation of the debonding mechanism in steel FRP- and FRCM-concrete joints, In 4th Workshop on the new boundaries of structural concrete. (2016), 289-298.
- [20] M. Bagheri, A. Chahkandi, H. Jahangir, Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers, International Journal of Civil Engineering, 17(11) (2019) 1785-1797.
- [21] H. Jahangir, M. R. Esfahani, Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour, Steel and Composite Structures, 34(6) (2020) 877-889.
- [22] M.O. Kim, A. Bordelon, Fiber Effect on Interfacial Bond Between Concrete and Fiber-Reinforced Mortar. Transportation Research Board, 2591(1) (2016), 11–18.
- [23] S. Feng, H. Xiao, J. Geng, Bond strength between concrete substrate and repair mortar: Effect of fibre stiffness and substrate surface roughness, Cement and Concrete Composites, 114 (2020), 1-14.
- [24] M. Naderi, New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, Journal of Testing and Evaluation, 35(6) (2007), 602-608.
- [25] 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), p.6.
- [26] 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), p.5.
- [27] BHRC Publication, The National Method for Concrete
- [6] S. Vikrant, V. Kavita, S. Kene, N.V. Deshpande, Investigation on Compressive and Tensile Behavior of Fibrillated Polypropylene Fibers Reinforced Concrete, International Journal of Engineering Research Applied, 2(3) (2012), 1111-1115.
- [7] G.P. Tilly, J. Jacobs, Concrete repairs: Observations on performance in service and current practice, Watford, UK, (2007), ISBN: 978-1-86081-974-2.
- [8] H. Beushausen, M. Alexander, Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. Materials Structure, 40 (2007), 189–199.
- [9] D. Wu, W. Gao, J. Feng, K. Luo, Structural behaviour evolution of composite steel-concrete curved structure with uncertain creep and shrinkage effects. Composite Building Engineering, 24 (2016), 261-272.
- [10] G. Martinola, H. Sadouki, F. Wittmann, Numerical model for minimizing the risk of damage in a repair system, Journal of Materials in Civil Engineering, 13 (2001), 121–129.
- [11] 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), p.5.
- [12] M. Naderi, Analysis of the slant shear test, Journal of Adhesion Science Technology, 23(2) (2009), 229-245.
- [13] M. Naderi, Friction-Transfer Test for the Assessment of in-situ Strength & Adhesion of Cementitious Materials, Construction and Building Materials, 19(6) (2005), 454-459.
- [14] M. Naderi, O. Ghodousian, Adhesion of Self-Compacting Overlays Applied to Different Concrete Substrates and Its Prediction by Fuzzy Logic, Journal of Adhesion, 88(10) (2012), 848-865.
- [15] M. Naderi, Effects of Cyclic Loading, Freeze-Thaw and Temperature Changes on Shear Bond Strengths of Different Concrete Repair Systems, Journal of Adhesion, 84(9) (2008), 743-763.
- [16] M. Naderi, R. Shibani, New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength, Australian Journal of

- strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). American Society for Testing and Materials, (2013), p.12.
- [32] A. Alnkaa, H. Yaprak, S. Memis, G. Kaplan, Effect of Different Cure Conditions on the Shrinkage of Geopolymer Mortar, International Journal of Engineering Research and Development, 14(10) (2018), 51-55.
- [33] R. Chendes, S. Dan, L. Courard, Comparison of shear and pull-off tests for testing adhesion of different content limestone fillers mortars used as repair system, Construction sustainability, 15 (2013), 1-6.
- [34] J. Silfwerbrand, Shear bond strength in repaired concrete structures, Material Structuter, 36 (2003), 419-424.
- Mix Design. Building and Housing Research Center. No. S-479. 2008, p.50.
- [28] BHRC Publication, Iranian National Building Code, Division 5, Building Materials Products, (2017), p.286.
- [29] ASTM C157, Test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete. West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials, (2008), p.8.
- [30] 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), p.5.
- [31] ASTM C109. Standard test method for compressive

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Saberi Varzaneh, M. Naderi, Using "twist-off" and "pull-off" tests to investigate the effect of polypropylene fibers on the bond of mortar/concrete and to evaluate their in-situ compressive strength, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 1675-1690.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19711.7240

