

## The effect of initial compression on the interface of repair/concrete and the evaluation of the compressive strength of mortars

Ali Saberi Varzaneh<sup>1\*</sup>, Mahmood Naderi<sup>2</sup>

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

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

### ABSTRACT

One of the key factors that reduce the bond strength between repair mortars and concrete substrate is improper compaction of the repair layer when applied to concrete. Due to the fact that compacting has a direct effect on the adhesion of the interface of two layers, so the lack of proper compaction causes small cavities between the two layers and as a result causes a decrease in bond strength. Therefore, in this paper, by applying semi-destructive tests, by applying initial compression for 24 hours on the mortar applied to the concrete substrate, the effect of compression on bond between the repair layer and the concrete has been studied. The effect of one week of curing on the dry shrinkage of repair mortars is also presented. In the following, the compressive strength of repair mortars was evaluated using the "twist-off" and "pull-off" tests. In this regard, calibration diagrams were drawn between laboratory tests and semi-destructive tests and linear equations were presented to convert the original results from semi-destructive tests to the compressive strength of mortars. ABAQUS software was used to investigate cracks and stresses in mortars. The results show an increase in bond strength between the repair mortar and the concrete substrate by applying initial compression. Applying initial compression of  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  on unhardened mortar increased the shear and tensile strength between the repair and concrete layers at the age of 90 days by 36.9% and 31.4%, respectively. Also, a linear relationship with high correlation was observed between the readings obtained from the above tests with the compressive strength of repair mortars.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.252708.2260

\*Corresponding author: Ali Saberi Varzaneh  
Email address: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

### ARTICLE INFO

Receive Date: 13 October 2020

Revise Date: 18 October 2021

Accept Date: 14 November 2021

**Keywords:** Shrinkage  
Compaction  
In-situ methods  
Bond  
ABAQUS

## تأثیر فشار اولیه بر مقاومت چسبندگی بین لایه تعمیر و بتن بستر و ارزیابی مقاومت فشاری ملات های تعمیر با به کارگیری آزمون های نیمه مخرب

علی صابری ورزنه<sup>۱\*</sup>، محمود نادری<sup>۲</sup>

۱- دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### چکیده

یکی از عوامل کلیدی که باعث افت مقاومت چسبندگی بین ملات های تعمیر و بتن بستر بتنی می گردد، تراکم نامناسب لایه تعمیر در هنگام اعمال روی بتن می باشد. با توجه به اینکه تراکم تأثیر مستقیم بر چسبندگی سطح مشترک دو لایه دارد، لذا عدم تراکم مناسب باعث به وجود آمدن حفرات ریز بین دو لایه شده و در نتیجه موجب افت مقاومت چسبندگی می گردد. لذا در این مقاله با به کارگیری آزمون های نیمه مخرب "پیچش" و "کشیدن از سطح"، با اعمال فشارهای اولیه به مدت ۲۴ ساعت روی ملات اعمال شده بر بستر بتنی، تأثیر فشارها بر چسبندگی برشی و کششی بین لایه تعمیر و بتن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر یک هفته عمل آوری بر جمع شدگی ملات های تعمیر ارائه گردیده است. در ادامه نیز با استفاده از آزمون های درجای "پیچش" و "کشیدن از سطح"، مقاومت فشاری درجای ملات های تعمیر ارزیابی شده است. در این خصوص اقدام به رسم نمودارهای کالیبراسیون بین آزمون های آزمایشگاهی و آزمون های نیمه مخرب گردید و معادلات خطی جهت تبدیل نتایج حاصل از آزمون های نیمه مخرب به مقاومت فشاری ملات ها ارائه شده است. برای بررسی ترک ها و تنش های به وجود آمده در ملات ها، از نرم افزار ABAQUS استفاده شد. نتایج حاصله بیانگر افزایش مقاومت چسبندگی برشی و کششی حاصل از آزمون های "پیچش" و "کشیدن از سطح" بین ملات تعمیر و بستر بتنی با اعمال فشارهای اولیه می باشد. اعمال پیش فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی مربع روی ملات سفت نشده باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین لایه تعمیر و بتنی در سن ۹۰ روز به ترتیب برابر ۳۶/۹ و ۳۱/۴ درصد گردیده است. همچنین رابطه خطی با همبستگی بالا بین قرائت های به دست آمده از آزمون های فوق با مقاومت فشاری ملات های تعمیر مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: جمع شدگی، تراکم، آزمون های درجا، چسبندگی، آباکوس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.252708.2260">https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.252708.2260</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.252708.2260	۱۴۰۱/۵/۰۱	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۷/۲۶	۱۳۹۹/۷/۲۲
علی صابری ورزنه ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

ملات‌های سیمانی دارای کاربردهای فراوانی بوده از جمله استفاده به عنوان مصالح تعمیراتی المان‌های بتنی که بر اثر شرایط مختلف فیزیکی یا شیمیایی دچار آسیب شده‌اند. لذا اطلاع از مشخصات مکانیکی ملات‌ها برای استفاده درست در محل مناسب، امری ضروری می‌باشد. روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری مقاومت مصالح سیمانی به صورت درجا در محل وجود دارد که به طور کلی به سه گروه "مخرب"، "نیمه مخرب" و "غیر مخرب" تقسیم می‌شوند. روش‌های مخرب، شامل بارگذاری المان به صورت مستقل یا بارگذاری آن در سازه و یا مغزه‌گیری از قسمتی از قطعه و آزمایش نمودن آن در آزمایشگاه می‌باشد [۱]. اما معایبی در استفاده از این روش‌ها وجود دارد از جمله می‌توان به خسارت قابل توجه به سازه، هزینه بالا، قابلیت تکرار محدود و معمولاً تعطیلی بهره‌برداری از سازه اشاره نمود. همچنین در تحقیقی بر روی مقاوت فشاری مغزه‌های گرفته شده از یک المان بتنی مشاهده شد که نتایج به دست آمده از آزمایشات بر روی مغزه‌ها، کمتر از مقاوت فشاری واقعی می‌باشد [۲] همچنین قسمت‌هایی از سازه، امکان دارد انجام مغزه‌گیری میسر نباشد. روش "بیرون کشیدن" روش درجای دیگری است [۳] که در دسته روش‌های مخرب قرار دارد و باعث آسیب رساندن به المان بتنی می‌گردد.

لذا گرایش به تعیین مشخصات مکانیکی مصالح با انجام آزمایش‌های درجا، در قالب روش‌های غیر مخرب یا نیمه مخرب روز به روز بیشتر می‌شود. روش‌های غیر مخرب مانند آزمایش چکش اشमित [۴] و اولتراسونیک [۵] می‌توانند، برخی از ویژگی‌های مصالح را اندازه‌گیری نمایند. روش‌های نیمه مخرب، می‌توانند با ایجاد خرابی کم، نتایج خوبی از مقاوت مصالح در محل را ارائه نمایند. از جمله روش‌های درجا می‌توان به آزمون‌های "پیچش" [۶] و "کشیدن از سطح" [۷] اشاره نمود. در تحقیقات قبلی، از آزمون "پیچش" برای تعیین مقاوت فشاری بتن استفاده شده است که در آن ضریب همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با مقاوت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی و مغزه‌های گرفته شده از همان بتن به ترتیب برابر ۹۷ و ۹۰ درصد به دست آمده است [۶]. در تحقیق دیگری برای مقایسه نتایج حاصل از آزمون "پیچش" و مقاوت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی با مقاوت‌های مختلف، ضریب همبستگی ۹۵ درصد بین نتایج به دست آمد [۸]. نتایج فرائت شده از آزمون "پیچش" با مقاوت فشاری بتن‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف نیز دارای ضریب همبستگی بالایی هستند به گونه‌ای که در یک تحقیق مقدار ضریب همبستگی حدود ۹۹ درصد به دست آمده است [۹]. در تحقیقاتی مشخص گردید که در صورت استفاده از آزمون "پیچش" برای اندازه‌گیری مقاوت سطحی بتن‌های معمولی و الیافی، ضریب همبستگی بالای ۰/۹۵ بین نتایج آزمون "پیچش" با نتایج حاصل از دستگاه جک بتن شکن وجود دارد [۱۰-۱۱]. همچنین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" نشان داد که با دقت بالای ۰/۹۴ می‌توان مقاوت فشاری ملات‌های اصلاح شده با پلیمر را اندازه‌گیری نمود [۱۲]. در تحقیقی دیگر برای اندازه‌گیری مقاوت سطحی ملات‌های سیمانی معمولی با استفاده از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" مشخص گردید که نتایج مقاوت سطحی حاصل از هر دو روش دارای ضریب همبستگی بالای ۹۳ درصد با مقاوت کششی ملات‌ها می‌باشد [۱۳]. همچنین در تحقیقات دیگری که برای ارزیابی مقاوت فشاری ملات‌های مسلح به الیاف صورت پذیرفت مشخص گردید مقاوت سطحی حاصل از آزمون‌های "پیچش" و "کشیدن از سطح" دارای همبستگی بالای ۹۲ درصد با مقاوت فشاری می‌باشند [۱۴]. یک روش دیگر که در آن نیز مانند آزمون "پیچش"، با وارد نمودن ممان پیچشی اقدام به ارزیابی مقاوت مصالح می‌نمایند، آزمون "انتقال اصطکاک" [۱۵] می‌باشد. در تحقیقات قبلی از آزمون "انتقال اصطکاک" برای اندازه‌گیری مقاوت صخره سنگ‌ها [۱۶]، رویه‌های آسفالتی [۱۷] و اندازه‌گیری چسبندگی بین دو لایه [۱۸] استفاده شده است. آزمایشات نشان داده است که ضریب همبستگی بالایی بین نتایج حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" و مقاوت فشاری بتن وجود دارد [۱۹].

یکی از عوامل موثر در افزایش چسبندگی بین ملات و بتن، تراکم مناسب ملات تعمیراتی در هنگام اعمال آن روی بستر بتنی می‌باشد. فصل مشترک ملات و بستر دارای اهمیت فراوانی می‌باشد، زیرا عدم تراکم مناسب باعث ایجاد حفرات ریز بین سطح مشترک شده و یکی از عوامل اصلی در کاهش مقاوت چسبندگی می‌باشد. در تحقیقی روی تاثیر عملیات فشرده سازی بر مقاوت بتن خود متراکم مشاهده شد که تراکم مناسب باعث افزایش حدود ۵ درصدی مقاوت فشاری بتن می‌گردد [۲۰]. در تحقیقی دیگر در خصوص ارزیابی مقاوت بتن‌های تحت فشرده سازی متفاوت، نتیجه گرفته شد که نتایج مقاوت فشاری حاصل از آزمون‌های "چکش اشमित"، "اولتراسونیک" و "بیرون کشیدن" بسیار تحت تاثیر طریقه فشرده سازی و تراکم می‌باشد [۲۱]. همچنین در تحقیقی دیگر روی تاثیر

فشرده سازی بر مقاومت فشاری بتن های معمولی مشخص گردید که تراکم مناسب باعث افزایش مقاومت فشاری بین ۴ تا ۸ مگاپاسکال می گردد [۲۲].

برای افزایش مقاومت چسبندگی بین ملات و بتن، راه کارهای فراوانی وجود دارد. در این زمینه تحقیقات گسترده ای صورت پذیرفته است. یکی از این عوامل، جمع شدگی ملات های تعمیری می باشد. جمع شدگی یکی از مشکلات مهم می باشد که تاثیر منفی روی مقدار چسبندگی ملات تعمیری و بستر بتنی می گذارد. جمع شدگی باعث ایجاد تنش کششی در داخل ملات می شود که با توجه به اینکه ملات ها دارای مقاومت کششی پایینی می باشند لذا دچار ترک خوردگی می شوند. جمع شدگی حاصل از خشک شدگی به دلیل از دست رفتن رطوبت داخل ملات می باشد. با توجه به اینکه خمیر سیمان هیدراته شده دارای منافذ مویرگی می باشد که حاوی مقداری آب هستند، بعد از خارج شدن این رطوبت از منافذ، جمع شدگی اتفاق می افتد [۲۳]. بنا به تحقیقات انجام گرفته شکست های زودرس در سیستم های چند لایه بتنی عمدتاً مربوط به عدم وجود سازگاری کافی مشخصه های لایه های تعمیری و بتن بستر می باشد [۲۴]. یکی از این مشخصه ها جمع شدگی حاصل از خشک شدن می باشد. بنا به گزارشات بعضی محققین تفاوت در مقدار جمع شدگی حادث بین لایه تعمیری و بتن قدیم، عامل اصلی اضمحلال چسبندگی بین این دو سیستم می گردد [۲۵]. با توجه به اینکه مخلوط های سیمانی تمایل به جمع شدگی دارند [۲۶]، لذا خشک شدگی زود هنگام بتن، باعث به وجود آمدن جمع شدگی و ترک های ریز در سطح بتن می گردد [۲۷]. برای اعضای بتنی که توسط اعضای مجاور محدود شده اند، ممکن است به دلیل جمع شدگی بیش از حد، ترک هایی نیز رخ دهد [۲۸]. استفاده از روش های عمل آوری مرطوب می تواند موثر بوده و از خروج رطوبت از داخل ملات جلوگیری نماید. در تحقیقی مشخص گردید که چسبندگی بین بتن و ملات بدون عمل آوری حدود ۳/۵ برابر کاهش پیدا می نماید [۲۹]. البته با توجه به اینکه جمع شدگی ملات ها برای مدت زمان طولانی ادامه دارد و عمل آوری حداکثر برای ۱۰ روز بیشتر انجام نمی پذیرد لذا می بایست از راه حل های اضافی جهت حفظ چسبندگی بین ملات و بستر استفاده نمود.

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 و ماتریس سیمانی مسلح به الیاف به دلیل برخی از مزایایی که در مقایسه با مصالح سنتی ارائه می دهند، موفقیت هایی 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 [۳۰]. 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 [۳۱]. گروت مسلح به فولاد از مصالح تعمیری جدید دیگری می باشد که باعث بهبود چسبندگی با سطح بستر بتنی می گردد [۳۲].

همانطور که ذکر شد در تحقیقات قبلی با استفاده از عمل آوری های مختلف یا با به کارگیری الیاف در ملات ها اقدام به افزایش چسبندگی بین ملات و بستر بتنی شده است. اما در این تحقیق برای افزایش مقاومت چسبندگی بین ملات های تعمیری و بستر بتنی، علاوه بر تاثیر عمل آوری بر جمع شدگی ملات های تعمیری، اقدام به اعمال پیش فشارهای مختلف روی ملات تعمیری گردیده است و تاثیر این پیش فشار بر مقاومت چسبندگی سطح مشترک بین ملات و بتن با به کارگیری آزمون های "پیچش" و "کشیدن از سطح" مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با بررسی تئوری جذب فیزیکی و عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی، تاثیر عمل آوری روی ملات و پیش فشار بر مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات و بتن نشان داده شده است. در ادامه نیز با استفاده از آزمون های نیمه مخرب و درجای "پیچش" و "کشیدن از سطح"، مقاومت فشاری ملات ها در سنین مختلف و به صورت درجا ارزیابی شده است. با اندازه گیری ضریب همبستگی و رسم نمودارهای کالیبراسیون، معادلات تبدیل نتایج آزمون های درجا به آزمون های آزمایشگاهی ارائه شده است. برای صحت سنجی نتایج نیز با استفاده از نرم افزار ABAQUS توزیع تنش ها و ترک ها در اعمال آزمون های پیچش و کشیدن از سطح روی ملات ها نشان داده شده است.

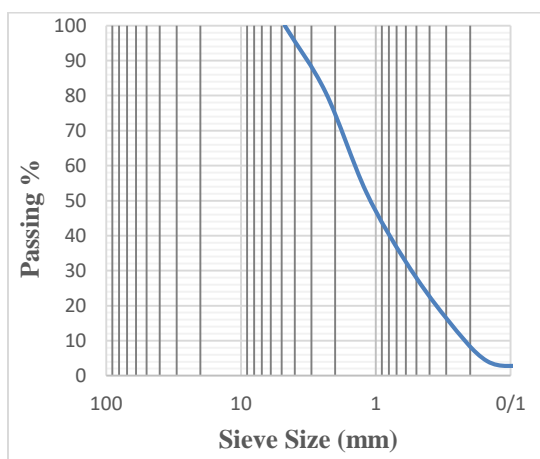
## ۲- کارهای آزمایشگاهی

## ۲-۱- مصالح مصرفی

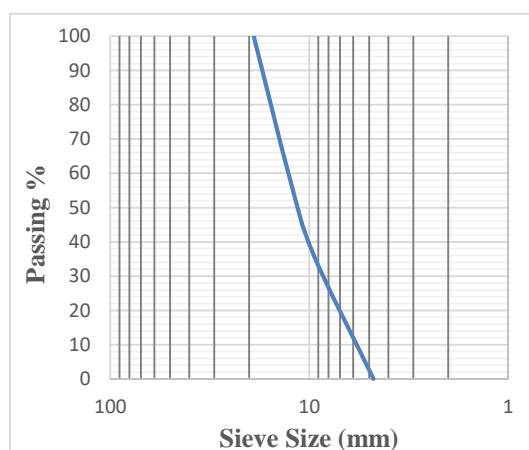
مواد و مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: سیمان تیپ ۲ محصول کارخانه سیمان آبیگ، ماسه از معادن شهریار، آب آشامیدنی شهر قزوین، شن از معادن قزوین، چسب دو جزئی از نوع رزین‌های اپوکسی با ترکیب حجمی یک به یک و مواد عمل‌آورنده از نوع پلی‌اولفین. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی ارائه شده است. دانه بندی سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136 [۳۳] انجام پذیرفت. میزان جذب آب شن و ماسه بر اساس استانداردهای ASTM C127 [۳۴] و ASTM C128 [۳۵] به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۶ درصد بدست آمد. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ (درصد)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Loss on ignition	Alkali as Na <sub>2</sub> O
۲۱/۱	۴/۳	۳/۲	۶۳/۹	۲/۰	۰/۲	۰/۵	۳/۰	۱/۲	۰/۵۵



ب) دانه‌بندی ماسه



الف) دانه‌بندی شن

شکل ۱: نمودار دانه بندی سنگدانه ها

مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی

مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت برشی	زمان گیرش		زمان عمل‌آوری	
			۳۵°C	۲۵°C	۳۵°C	۲۵°C
۱۲۷۵۰ مگاپاسکال	۷۰ مگاپاسکال	۱۵ مگاپاسکال	۴ ساعت	۱۰ ساعت	۴۵ دقیقه	۹۰ دقیقه

طرح اختلاط بتن بستر نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

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

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

برای ساخت ملات های تعمیری اعمال شده بر بستر بتنی از نسبت سیمان به ماسه برابر ۱ به ۳ استفاده شده است. نسبت آب به سیمان نیز برابر ۰/۵ می باشد. به علت ثابت نبودن رطوبت سنگدانه‌ها در فضای آزاد، ابتدا شن و ماسه به مدت هفتاد و دو ساعت در فضای آزمایشگاه قرار گرفتند و 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- ساخت نمونه ها

نمونه های استاندارد آزمایشگاهی برای تعیین مقاومت فشاری ملات های تعمیری تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در قالب قرار گرفتند. سپس از قالب خارج و تا زمان آزمایش داخل آب گذاشته شدند. هم زمان نمونه های مورد نیاز برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات ها با به کارگیری آزمون های نیمه مخرب تهیه و داخل آب قرار گرفتند. برای تعیین مقاومت چسبندگی بین ملات های تعمیری و بستر بتنی، ملات ها به ضخامت ۲۵ میلی متر روی بستر بتنی اعمال گردیدند و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و به مدت ۷ روز تحت عمل آوری با آب قرار داده شدند و سپس از آب خارج و در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز تحت آزمایش قرار گرفتند. همچنین هم زمان نمونه های منشوری استاندارد جهت اندازه گیری جمع شدگی ملات ها تهیه و به مدت یک هفته در عمل آوری با آب گذاشته شدند. جمع شدگی نمونه ها در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه اندازه گیری شد. برای اعمال پیش فشار روی ملات های تعمیری، ابتدا ملات های تعمیری روی بستر بتنی اعمال گردید، سپس فشارهای مختلف به مدت ۲۴ ساعت روی ملات اعمال گردید. فشار های وارده برابر ۰/۱، ۰/۵، ۵ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد. به عبارتی به ترتیب حدود ۰/۲۵، ۱۰۰، ۱۱۰۰ و ۲۲۵۰ کیلوگرم وزنه روی ملات ها قرار گرفت. وزنه های ۲۵ و ۱۰۰ کیلوگرمی به صورت دستی روی ملات ها قرار گرفت و وزنه های ۱۱۰۰ و ۲۲۵۰ توسط جک فشاری بتن شکن اعمال گردید. ملات ها به مدت ۷ روز در عمل آوری داخل آب قرار گرفته و سپس تا زمان آزمایش در فضای آزاد رها گردیدند.

## ۲-۳- روش های آزمایشگاهی

برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات ها با استفاده از آزمون "پیچش" ابتدا استوانه فولادی به قطر ۵۰ میلی متر روی سطح محل آزمون چسبانده شده و سپس با به کارگیری یک ترکمر معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی اعمال می گردد تا از سطح ملات جدا گردد (شکل ۲-الف). برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات ها توسط آزمون "کشیدن از سطح" نیز یک استوانه فولادی به قطر ۵۰ میلی متر روی سطح ملات چسبانده می شود، سپس با استفاده از دستگاه به استوانه نیروی کششی اعمال می گردد تا استوانه از سطح ملات جدا گردد (شکل ۲-ب).



ب) روش "کشیدن از سطح"



الف) روش "پیچش"

شکل ۲: ارزیابی مقاومت فشاری ملات ها

برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی بین لایه‌های تعمیری و سطوح بتنی با روش "پیچش"، ابتدا باید مغزه جزئی در سطح لایه تعمیری به گونه‌ای ایجاد کرد که عمق مغزه جزئی حدود پنج میلی‌متر به درون بستر بتنی ادامه یابد. پس از تعبیه مغزه جزئی، استوانه فلزی بر روی مغزه جزئی چسبانده می‌شود. سپس با بکارگیری یک پیچش‌سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی، لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا مغزه جزئی دچار شکست گردد (شکل ۳-الف). با توجه به لنگر پیچشی نهائی، با استفاده از رابطه بین تنش برشی ( $\tau$ ) و لنگر پیچشی

(T)، مقدار چسبندگی لایه تعمیری را محاسبه می‌نمائیم (رابطه ۱).

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن c شعاع مغزه جزئی و J ممان قطبی دوم سطح است. برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی کششی با روش "کشیدن از سطح" ابتدا مغزه‌ای جزئی به قطر پنج سانتی‌متر تا داخل لایه بتن بستر انجام می‌گیرد. سپس یک استوانه فلزی به قطر پنج سانتی‌متر بر روی محل چسبانده شده و با استفاده از دستگاه کشیده می‌شود تا دچار شکست گردد (شکل ۳-ب). تنش کششی ایجاد شده در سطح تماس بین لایه تعمیری و بتن بستر ( $\sigma$ )، مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن P نیروی کششی و A مساحت تماس است.



ب) روش "کشیدن از سطح"



الف) روش "پیچش"

شکل ۳: اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین ملات و بتن

برای به دست آوردن میزان جمع‌شدگی نمونه‌ها از استانداردهای ASTM C157 [۳۶] و ASTM C490 [۳۷] استفاده شده است. قالب‌های جمع‌شدگی ملات به صورت منشوری با مقطع مربعی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۸۵ میلی‌متر است (شکل ۴). مقایسه کننده طول جهت تعیین تغییرات طول نمونه‌های ساخته شده در قالب‌ها باید مجهز به یک اندازه‌گیر عقربه‌ای یا هر وسیله اندازه‌گیری مدرج دیگری برای قرائت ۰/۰۰۲ میلی‌متر یا کمتر باشد. مطابق با استاندارد، می‌بایست برای هر نمونه حداقل ۳ آزمون ساخته شود. برای اندازه‌گیری مقدار جمع‌شدگی بر حسب درصد از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، L تغییر طول نمونه،  $L_x$  قرائت نمونه منهای قرائت میله مرجع،  $L_i$  قرائت اولیه نمونه منهای قرائت میله مرجع و G برابر طول میله مرجع است.



شکل ۴: قالب منشوری جمع‌شدگی

## ۳- نتایج به دست آمده و تحلیل آن‌ها

## ۳-۱- تاثیر پیش فشار بر مقاومت چسبندگی برشی

در این بخش با اعمال پیش فشار به ملات‌های تعمیراتی روی بستر بتنی، تاثیر آن را بر مقاومت چسبندگی برشی و کششی ارزیابی می‌نماییم. ابتدا ملات‌های تعمیراتی روی بستر بتنی اعمال گردید، سپس فشارهای مختلف به مدت ۲۴ ساعت روی ملات اعمال گردید. فشارهای وارده برابر ۰/۱، ۰/۵، ۵ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. به عبارتی به ترتیب حدود ۲۵، ۱۰۰، ۱۱۰۰ و ۲۲۵۰ کیلوگرم وزنه روی ملات‌ها قرار گرفت. وزنه‌های ۲۵ و ۱۰۰ کیلوگرمی به صورت دستی روی ملات‌ها قرار گرفت و وزنه‌های ۱۱۰۰ و ۲۲۵۰ توسط جک فشاری بتن شکن اعمال گردید. ملات‌ها به مدت ۷ روز در عمل‌آوری داخل آب قرار گرفته و سپس تا زمان آزمایش در فضای آزاد رها گردیدند. تست‌ها در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز انجام پذیرفت.

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



ب) فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

الف) فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

شکل ۵: نتایج حاصل از آزمون "پیچش" برای ملات تحت فشارهای متفاوت

از شکل ۵-الف ملاحظه می‌گردد که اعمال پیش فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیراتی و بستر بتنی حاصل از آزمون "پیچش" در سنین مختلف گردیده است. البته مقدار افزایش مقاومت چسبندگی برشی، چشمگیر نمی‌باشد. مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای ملات بدون پیش فشار به ترتیب برابر ۳/۲۷، ۲/۵۶ و ۲/۰۳ مگاپاسکال می‌باشد در حالیکه برای ملات تحت پیش فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در سنین مذکور به ترتیب برابر ۳/۳۹، ۲/۷ و ۲/۲۱ مگاپاسکال می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که اعمال ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز به ترتیب برابر ۳/۷، ۵/۴ و ۸/۸ درصد می‌باشد.

از شکل ۵-ب ملاحظه می‌گردد که اعمال پیش فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیراتی و بستر بتنی حاصل از آزمون "پیچش" در سنین مختلف گردیده است. مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای ملات بدون پیش فشار به ترتیب برابر ۳/۲۷، ۲/۵۶ و ۲/۰۳ مگاپاسکال می‌باشد در حالیکه برای ملات تحت پیش فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در سنین مذکور به ترتیب برابر ۳/۴۳، ۳/۰۵ و ۲/۷۸ مگاپاسکال می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که اعمال ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز به ترتیب برابر ۴/۹، ۱۹/۱ و ۳۶/۹ درصد می‌باشد.

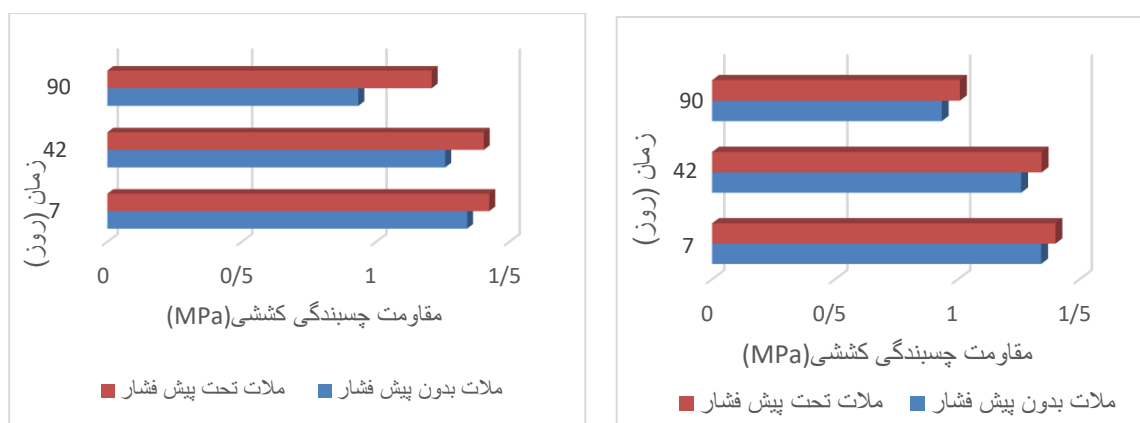
ملاحظه می‌گردد که اعمال پیش فشار روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیراتی و بستر بتنی گردیده است. البته در فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقدار افزایش، چشمگیر نمی‌باشد اما در فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقدار



افزایش مقاومت چسبندگی برشی بیشتر می باشد مخصوصاً در سنین بالا این افزایش بیشتر به چشم می آید. دلیل افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و بتن بستر تحت پیش فشار می تواند به دلیل تراکم بیشتر ملات در فشار باشد زیرا یکی از عوامل مهم بر مقدار چسبندگی، میزان فشردگی لایه تعمیر می باشد. همچنین با اعمال پیش فشار، امکان تماس ذرات تشکیل دهنده ملات با سطح بتن بستر بیشتر شده و همین امر سبب افزایش مقاومت چسبندگی می گردد. در پیش فشارهای بالا (۵ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) تاثیر مثبتی روی چسبندگی مشاهده نگردید و لذا نتایج ذکر نشد. البته یکی از دلایل آن به علت خروج دوغاب داخل ملات در هنگام اعمال فشار بود که علاوه بر تلاش هایی که انجام شد برای حفظ دوغاب، اما این اتفاق رخ نداد.

### ۳-۲- تاثیر پیش فشار بر مقاومت چسبندگی کششی

در شکل ۶ نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" جهت تعیین مقاومت چسبندگی کششی برای ملات تحت فشارهای مختلف نشان داده شده است.



ب) فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

الف) فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

شکل ۶: نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" برای ملات تحت پیش فشارهای متفاوت

از شکل ۶-الف ملاحظه می گردد که اعمال پیش فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" در سنین مختلف گردیده است. البته مقدار افزایش مقاومت چسبندگی کششی، چشمگیر نمی باشد. مقاومت چسبندگی کششی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای ملات بدون پیش فشار به ترتیب برابر ۱/۳۴، ۱/۲۶ و ۰/۹۳ مگاپاسکال می باشد در حالیکه برای ملات تحت پیش فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در سنین مذکور به ترتیب برابر ۱/۴، ۱/۳۴ و ۱ مگاپاسکال می باشد. ملاحظه می گردد که اعمال ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز به ترتیب برابر ۴/۵، ۶/۳ و ۷/۵ درصد می باشد.

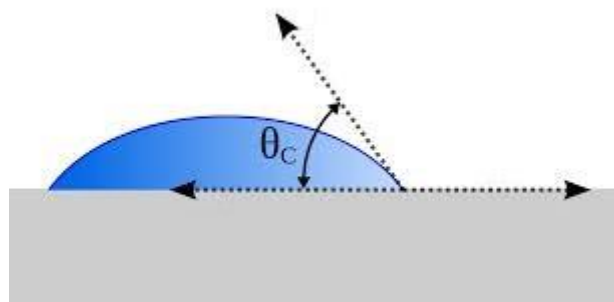
از شکل ۶-ب ملاحظه می گردد که اعمال پیش فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" در سنین مختلف گردیده است. مقاومت چسبندگی کششی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای ملات بدون پیش فشار به ترتیب برابر ۱/۳۴، ۱/۲۶ و ۰/۹۳ مگاپاسکال می باشد در حالیکه برای ملات تحت پیش فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در سنین مذکور به ترتیب برابر ۱/۴۳، ۱/۴ و ۱/۲۱ مگاپاسکال می باشد. ملاحظه می گردد که اعمال ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز به ترتیب برابر ۶/۷، ۱۱/۲ و ۳۰/۱ درصد می باشد.

همانند قسمت قبل ملاحظه می گردد که اعمال پیش فشار روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی کششی بین ملات تعمیری و بستر بتنی گردیده است. البته در فشار ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقدار افزایش، چشمگیر نمی باشد اما در فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقدار افزایش مقاومت چسبندگی کششی بیشتر می باشد مخصوصاً در سنین بالا این افزایش بیشتر به چشم می آید. دلیل

افزایش مقاومت چسبندگی کششی بین ملات و بتن بستر تحت پیش فشار می تواند به دلیل تراکم بیشتر ملات در فشار باشد زیرا یکی از عوامل مهم بر مقدار چسبندگی، میزان فشردگی لایه تعمیر می باشد. همچنین با اعمال پیش فشار، امکان تماس ذرات تشکیل دهنده ملات با سطح بتن بستر بیشتر شده و همین امر سبب افزایش مقاومت چسبندگی می گردد. در پیش فشارهای بالا (۵ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) تاثیر مثبتی روی چسبندگی مشاهده نگردید و لذا نتایج ذکر نشد. البته یکی از دلایل آن به علت خروج دوغاب داخل ملات در هنگام اعمال فشار بود که علاوه بر تلاش هایی که انجام شد برای حفظ دوغاب، اما این اتفاق رخ نداد.

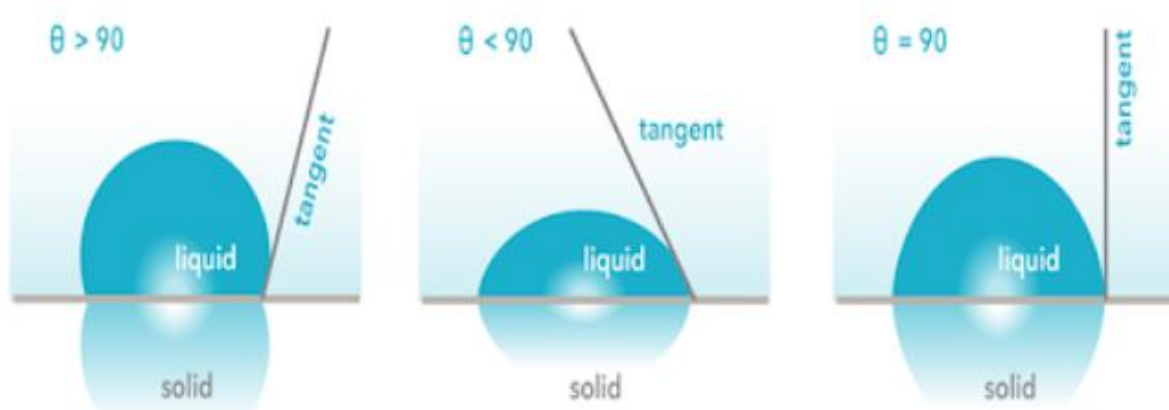
یکی از مهم ترین تئوری های چسبندگی، تئوری جذب فیزیکی می باشد. تئوری جذب فیزیکی در چسبندگی بین ملات و بتن نقش اساسی دارد و مبنای آن نیروهای بین مولکولی قطبی و هیدروژنی می باشد. بر اساس این تئوری، چسبندگی بهتر زمانی صورت می گیرد که مرطوب سازی سطح مورد نظر به بهترین صورت ممکن انجام گردد و چسب که در اینجا خمیره سیمان است به تمامی نقاط سطح برسد لذا برای این که پروسه مرطوب سازی بهتر رخ دهد، چسب باید کشش سطحی کمتری نسبت به کشش سطحی بحرانی ماده مورد نظر داشته باشد تا بدین وسیله بتواند راحت تر روی سطح ماده مورد نظر پخش شود و چسب درون مرزها و شکاف های لایه سطحی جریان یابد.

بهترین پخش شدگی چسب (که در اینجا خمیره سیمان است) روی سطح جامد (که در اینجا همان سطح بتن بستر است) به وسیله معیار زاویه تماس [۳۸] معلوم می گردد. این معیار در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: زاویه تماس مایع و جامد [۳۰]

هر چه زاویه  $\theta$  کمتر باشد بدین معنی است که کشش سطحی مایع نسبت به سطح جامد کمتر است به عبارت دیگر مایع بیشتر به جریان یافتن روی سطح جاد تمایل دارد. این مفهوم در شکل ۸ نمایان تر می باشد.



شکل ۸: زاویه تماس و پهن شدگی مایع [۳۰]

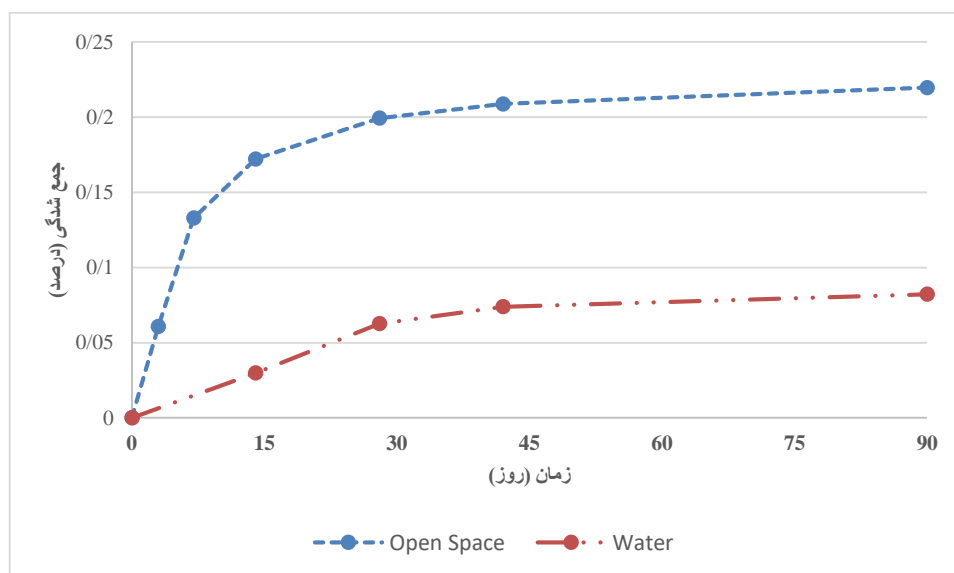
طبق شکل ۸، مایع وسطی دارای زاویه تماس کمتری بوده و لذا می تواند مرطوب سازی سطحی بهتری داشته باشد و در نتیجه چسبندگی بهتری نیز ایجاد نماید. از مفهوم زاویه تماس می توان اینگونه برداشت نمود که هر چقدر خمیره سیمان ملات، لزجت و کشش

سطحی کمتری داشته باشد و دارای روانی بیشتری باشد، سطح بتن را بستر را بهتر مرطوب نموده و در نتیجه چسبندگی را افزایش می دهد. اندازه گیری دقیق پارامتر زاویه تماس و در نتیجه آن جذب فیزیکی به خاطر عدم همگنی بودن و متخلخل بودن ملات و بتن، ممکن نیست و نمی توان در مورد آن اظهار نظر قطعی نمود.

میان این تئوری و نتایج این تحقیق، ارتباط نزدیک وجود دارد. همانطور که مشاهده گردید، اعمال پیش فشار روی ملات تعمیراتی که هنوز سفت نشده است باعث افزایش مقاومت چسبندگی بین ملات و سطح بستر گردیده است که یکی از علت های آن به دلیل تراکم بیشتر و طبق تئوری جذب فیزیکی به دلیل تماس بیشتر سطح اجزای ملات با سطح بتن بستر می باشد.

### ۳-۳- جمع شدگی ملات ها حاصل از خشک شدن

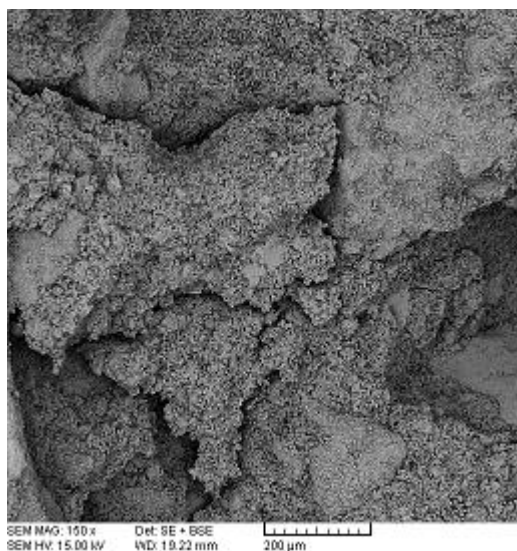
نتایج به دست آمده از تعیین جمع شدگی ملات ها در ادامه نشان داده شده است. در شکل ۷ نمودار مربوط به جمع شدگی ملات در سنین مختلف و تحت ۹ روز عمل آوری نشان داده شده است.



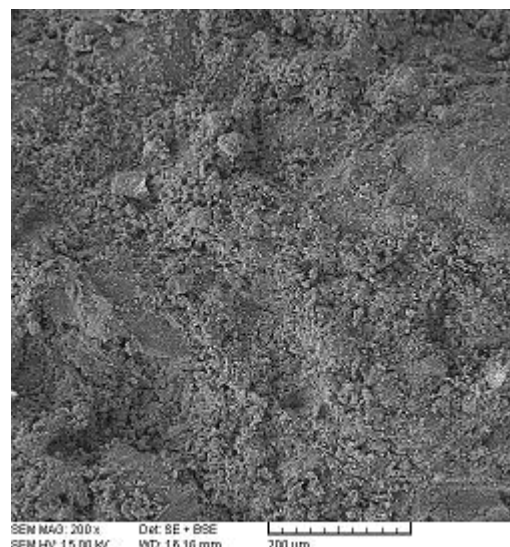
شکل ۹: نمودار جمع شدگی ملات

از شکل ۷ مشاهده می شود مقدار جمع شدگی ۹۰ روزه برای ملات تحت عمل آوری به صورت غرقاب داخل آب و رها شده در فضای آزاد به ترتیب برابر ۰/۰۸۲۲ و ۰/۲۱۹۶ درصد می باشد. مقدار جمع شدگی، برای ملات رها شده در فضای آزاد، به میزان ۶۲ درصد بیشتر از جمع شدگی ملات تحت عمل آوری در آب می باشد. در سن ۴۲ روز، مقدار جمع شدگی این ملات در دو عمل آوری ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۰۷۳۸ و ۰/۲۰۸۸ درصد می باشد. مشاهده می شود که رها نمودن نمونه در فضای آزاد باعث افزایش جمع شدگی به مقدار ۶۴ درصد نسبت به جمع شدگی نمونه تحت عمل آوری آب می باشد.

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 ۱۱ در قسمت های الف و ب به ترتیب ملات تحت عمل آوری داخل آب و ملات رها شده در فضای آزاد 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 ملاتی که مدتی در فضای آزاد رها گردیده است 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 رها شده در فضای آزاد



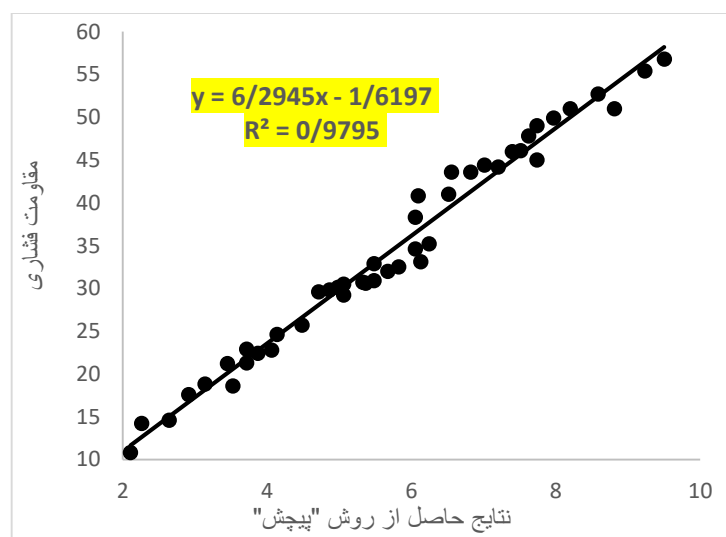
الف) ملات تحت عمل آوری

شکل ۱۱: تاثیر عمل آوری در کاهش ترک های حاصل از جمع شدگی ملات

### ۳-۴- ارزیابی مقاومت فشاری ملات تعمیری

در این قسمت مقاومت فشاری ملات تعمیری در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه که تا زمان آزمایش تحت عمل آوری های داخل آب و رها شده در فضای آزاد قرار داشته اند بررسی شده است.

در شکل ۱۲ رابطه بین مقاومت فشاری ملات تعمیری و نتایج حاصل از آزمون "پیچش" نشان داده شده است.

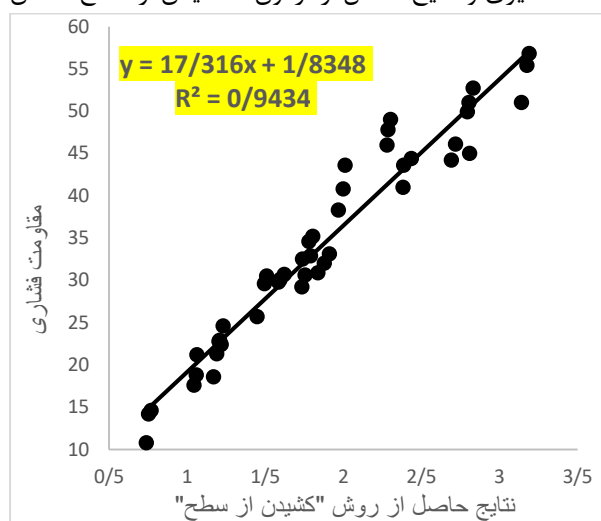


شکل ۱۲: رابطه مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از آزمون "پیچش" (مگاپاسکال)

از شکل ۱۲ مشاهده می شود که نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری ملات تعمیری دارای ضریب تعیین ۰/۹۷ و ضریب همبستگی ۰/۹۸ 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 در جای "پیچش"، مقاومت فشاری ملات را تعیین نمود. با توجه به نمودار شکل ۱۲ با استفاده از معادله

می توان با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون "پیچش" در معادله به جای عبارت  $X$ ، مقاومت فشاری ملات تعمیری را تعیین نمود.

در شکل ۱۳ رابطه بین مقاومت فشاری ملات تعمیری و نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" نشان داده شده است.



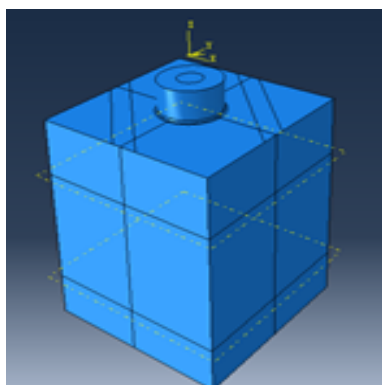
شکل ۱۳: رابطه مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" (مگاپاسکال)

با توجه به شکل ۱۳ نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" با مقاومت فشاری ملات دارای ضریب تعیین و ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۹۴ و ۰/۹۷ 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 در جای "کشیدن از سطح"، مقاومت فشاری ملات را تعیین نمود. با توجه به نمودار شکل ۱۳ با استفاده از معادله  $y=17.316x+1.8348$  می توان با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون "کشیدن از سطح" در معادله به جای عبارت  $X$ ، مقاومت فشاری ملات تعمیری را تعیین نمود.

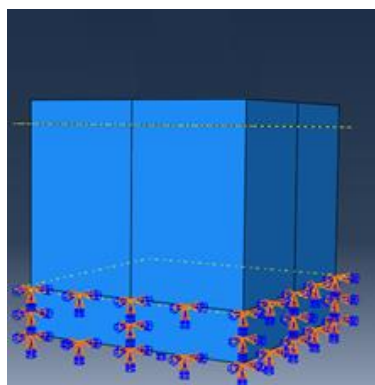
### ۳-۵- مدل سازی و تحلیل غیر خطی آزمون های نیمه مخرب

در نرم افزار آباکوس به صورت کاملا مجزا، خصوصیات رفتاری غیر الاستیک مصالح سیمانی توضیح داده شده است. یکی از مدل های موجود در برنامه آباکوس برای تحلیل و آنالیز بتن، مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP) می باشد که در این قسمت از تحقیق از آن استفاده شده است.

در تعریف رفتار بتن بعد از ترک خوردگی در کشش، طبق پیش فرض نرم افزار، مقدار احیای سخت شوندگی فشاری ضریب  $W_c$  برابر یک در نظر گرفته شد. مقدار ضریب  $W_t$  برابر صفر در نظر گرفته شده است تا از احیای سخت شوندگی کششی صرف نظر شود. برای معرفی مواد و منحنی تنش کرنش و مقادیر مورد نیاز از دستور Create Material استفاده شد. برای تعریف تکیه گاه ها در آزمون های "پیچش" و "کشیدن از سطح"، با توجه به حالت مشابه در آزمایشگاه، شرایط مرزی در نرم افزار معرفی گردیدند. با توجه به اینکه آزمون "پیچش" یک آزمون تقریبا نوین برای اندازه گیری چسبندگی و ارزیابی درجای مقاومت فشاری مصالح سیمانی می باشد لذا در این مقاله تصمیم گرفته شد که ضمن مدل سازی این آزمون با نرم افزار آباکوس، نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه مقایسه گردد. همچنین روند شروع ترک ها در حین انجام این آزمون با استفاده از مدل سازی تشریح شده است. مطابق شکل ۱۴ برای آزمون "پیچش" قسمت پایینی نمونه گیردار شد و برای آزمون "کشیدن از سطح" بالای نمونه گیردار گردید.



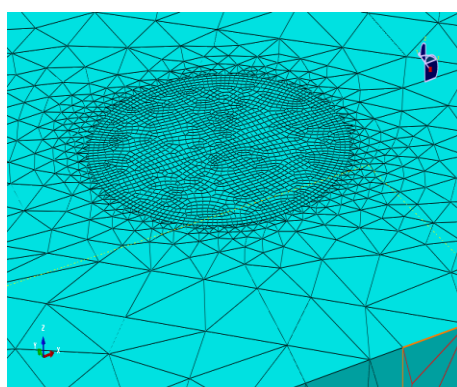
ب: آزمون "کشیدن از سطح"



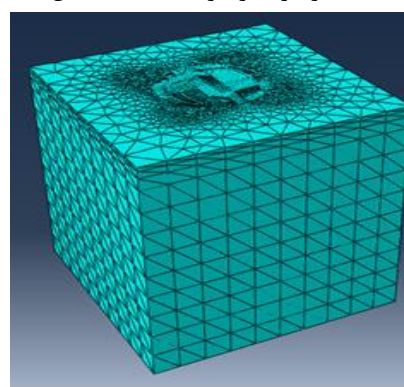
الف: آزمون "پیچش"

شکل ۱۴: تعریف شرایط مرزی

یکی از نکات مهم در مش بندی نمونه‌ها، همگرایی می‌باشد. نتایج به دست آمده از حل یک مسئله در روش المان محدود همواره به سائز مش‌ها و اندازه المان‌ها وابسته می‌باشد. با کاهش دادن ابعاد المان‌ها، می‌توان حل مساله را به یک جواب واحد همگرا نمود. در آزمون "پیچش" المان بندی در قطعه ی بتن به صورت ترکیبی از دو نوع المان C3D8R و C3D4 المان بندی شده است. بخش اصلی قطعه که تحت فشار یا کشش قرار می‌گیرد با المان مکعبی ۸ گرهی با انتگرال کاهش یافته C3D8R المان بندی شدند. اندازه المان در این بخش ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است که پس از همگرایی بین اندازه های ۲ و ۱ و ۰/۵ میلیمتر انتخاب شد. بخش های کناری که با نوع المان تتراگونال ۴ گرهی پیوسته المان بندی شده اند با حداکثر اندازه المان ۱۵ میلیمتر در کناره ها و حداقل اندازه المان ۱ میلیمتر در محل های متصل به المان های اصلی المان بندی شدند. در آزمون "کشیدن از سطح" المان بندی در قطعه ی بتن به صورت ترکیبی از دو نوع المان C3D4 و C3D8R المان بندی شده است. بخش اصلی قطعه که تحت پیچش یا کشش قرار می‌گیرد با المان مکعبی ۸ گرهی با انتگرال کاهش یافته C3D8R المان بندی شدند. اندازه المان در این بخش ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است که پس از همگرایی بین اندازه های ۲ و ۱ و ۰,۵ میلیمتر انتخاب شد. بخش های کناری که با نوع المان تتراگونال ۴ گرهی پیوسته المان بندی شده اند با حداکثر اندازه المان ۱۵ میلیمتر در کنار ها و حداقل اندازه المان ۱ میلیمتر در محل های متصل به المان های اصلی المان بندی شدند. قطعه چسب نیز با اندازه المان ۲ میلیمتر با نوع المان C3D8R و قطعه ی فولادی نیز با اندازه المان کلی ۲ میلیمتر المان بندی شد. در قطعه فولادی المان ها در راستای محوری ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شدند (شکل ۱۵).



ب: آزمون "کشیدن از سطح"



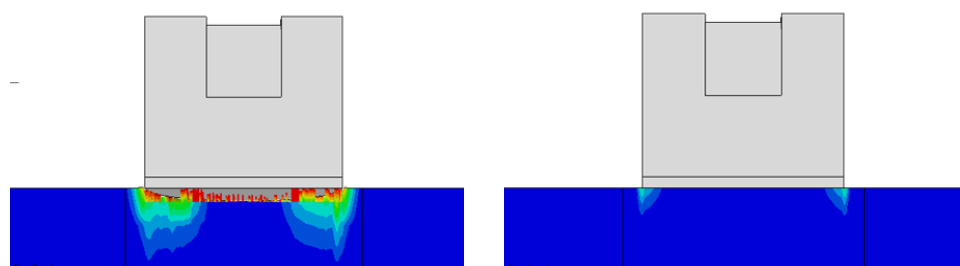
الف: آزمون "پیچش"

شکل ۱۵: المان بندی نمونه ها

یک نمونه ملات آزمایش شده در آزمایشگاه با مقاومت فشاری مکعبی ۴۷/۶ مگاپاسکال که در آزمون "پیچش" در لنگر پیچشی ۱۸۶ نیوتن متر و در آزمون "کشیدن از سطح" در نیروی ۴۵۰۰ نیوتن دچار شکست گردیده بود، برای مدل سازی در نرم افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که در آزمون "پیچش" مقدار لنگر نهایی که عامل شکست مغزه شده است برابر  $177/5$  نیوتن متر می‌باشد که با مقایسه نتیجه حاصل از آزمایشگاه روی همین نمونه که برابر  $186$  نیوتن متر می‌باشد همخوانی بالایی دارد. همچنین در آزمون "کشیدن از سطح" شکست در نیروی کششی برابر  $4555$  نیوتن اتفاق می‌افتد که با مقایسه با نتیجه حاصل از آزمایشگاه روی همین نمونه که برابر  $4500$  نیوتن می‌باشد همخوانی بالایی دارد.

در آزمون "پیچش"، نتایج حاصله بیان می‌کند که ماکزیمم گشتاوری که مدل تحمل می‌کند  $177/5$  نیوتن متر است. اولین ترک‌ها در ملات در گشتاور  $125$  نیوتن متری در کناره‌های نمونه شروع می‌شود. گشتاور با افزایش دوران افزایش پیدا می‌کند تا اینکه به میزان  $177$  نیوتن متر برسد که در این لحظه ترک‌ها به یکدیگر رسیده و خرابی در المان‌ها رخ می‌دهد. از این لحظه به بعد سرعت خرابی‌ها به دلیل کاهش سطح مقطع و کاهش مقاومت مغزه بیشتر می‌شود و در انتها شکست کامل در نمونه اتفاق می‌افتد (شکل ۱۶).

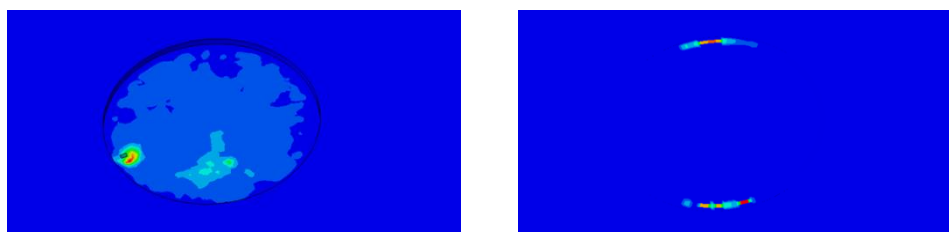


ب: لحظه شکست مغزه

الف: لحظه شروع ترک‌ها

شکل ۱۶: شکست مغزه در آزمون "پیچش"

در آزمون "کشیدن از سطح"، در نیروی  $2448$  نیوتن، ترک‌های اولیه در کناره‌های محل اتصال استوانه فولادی به نمونه ملات شروع می‌شود. در نیروی  $3814$  نیوتنی ترک به صورت چشم‌گیری رشد پیدا کرده و نهایتاً در نیروی  $4555$  نیوتن، مدل به نیروی بحرانی رسیده و پس از آن، رشد ترک افزایش پیدا کرده و نیروی فرایند کاهش پیدا می‌کند تا زمانی که نمونه به شکست کامل برسد (شکل ۱۷).



ب: لحظه شکست مغزه

الف: لحظه شروع ترک‌ها

شکل ۱۷: شکست نمونه در آزمون "کشش مستقیم"

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و همچنین مقایسه کامل بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی در ادامه ذکر شده است. در جدول ۴ نتایج حاصل از مدل‌سازی و اعمال آزمون‌های نیمه مخرب نشان داده شده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

نوع آزمون	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی	اختلاف نتایج (درصد)
پیچش (نیوتن-متر)	$177/5$	$186$	$4/7$
کشیدن از سطح (نیوتن)	$4555$	$4500$	$1/2$

از جدول ۶ مشاهده می‌گردد که اختلاف بین نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج به دست آمد از اعمال آزمون های "پیچش" و "کشیدن" از سطح" به صورت آزمایشگاهی به ترتیب کمتر از ۵ و ۲ درصد می باشد. مشاهده می شود که تفاوت اندکی میان نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل سازی وجود دارد که قابل چشم پوشی می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

- اعمال پیش فشار بر سطح ملات سفت نشده باعث گردید به دلیل افزایش سطح تماس بین ملات و بتن بستر، مقاومت چسبندگی برشی و کششی حاصل از آزمون های "پیچش" و "کشیدن" از سطح" افزایش یابد.
- با توجه به عکس های SEM، عدم عمل آوری باعث افزایش ترک های داخل ملات شده لذا باعث افزایش جمع‌شدگی گردیده که طبق نتایج آزمایشگاهی به مقدار ۶۴ درصد بیشتر از جمع‌شدگی نمونه های تحت عمل‌آوری شده با آب می‌باشد.
- با توجه به ضریب همبستگی بالا بین نتایج آزمون های درجا با مقاومت فشاری ملات های تعمیری، لذا با استفاده از معادلات  $y=6.29x-1.62$  و  $y=17.32x+1.83$  به ترتیب می توان با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون های "پیچش" و "کشیدن" از سطح" در معادله به جای عبارت  $x$ ، مقاومت فشاری ملات تعمیری را تعیین نمود.
- همخوانی بالایی بین نتایج عددی حاصل از نرم افزار آباکوس و نتایج به دست آمده از آزمون های درجا مشاهده گردید. همچنین طبق خروجی های نرم افزار، شکست مغزه ابتدا از اطراف استوانه ها که دارای بیشترین تنش می باشند شروع شده است.
- اعمال پیش فشار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی مربع روی ملات سفت نشده باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی و کششی بین لایه تعمیری و بتنی در سن ۹۰ روز به ترتیب برابر ۳۶/۹ و ۳۱/۴ درصد گردیده است.

#### مراجع

- [1] ASTM C42/C42M-18a. (2018). Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- [2] Masi. A., Digrisolo. A., Santarsieo. G. (2013). arsiere, "Experimental evaluation of drilling damage on the strength of cores extracted from RC buildings. In Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 7(7). p. 749.
- [3] ASTM C900-15. (2015) Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [4] ASTM C805/C805M-18. (2018) Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [5] ASTM C597-16. (2016) Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [6] M., Naderi, (2006) "Assessing the Insitu Strength of Concrete, Using new Twist-off Method", International Journal of Civil Engineering, Vol.4, No. 2, 146-155.
- [7] 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.
- [8] M., Naderi, (2013) "New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(2): 438-447.
- [9] M., Naderi, (2011) "Using Twist-Off Method for Measuring Surface Strength of Concretes Cured under Different Environments", Journal of Materials in Civil Engineering, 23: 385-392.
- [10] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi. (2020) Determination of Compressive and Flexural Strengths of In-situ Pozzolan Concrete Containing Polypropylene and Glass Fibers Using "Twist-off" Method. Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J). Vol.20, No.5.
- [11] M. Naderi, A. Smaili, and A. Saberi Varzaneh, (2021) Assessment of the application "twist-off" method for determining the in situ compressive and flexural strengths in the fiber concrete. Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE) Accepted paper.
- [12] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi, (2020) NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF SEMI-DESTRUCTIVE TESTS TO EVALUATE THE COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF POLYMER-



MODIFIED MORTARS AND THEIR ADHESION TO THE CONCRETE SUBSTRATE. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, 50(4), 537 – 544.

[13] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi, (2020) Determination of shrinkage, tensile and compressive strength of repair mortars and their adhesion on the concrete substrate using "twist-off" and "pull-off" methods. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00548-w>.

[14] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi, (2021) 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 Civil Engineering Journal*, 10.22060/CEEJ.2021.19711.7240.

[15] M., Naderi, (2005) "Friction-Transfer Test for the Assessment of in-situ Strength & Adhesion of Cementitious Materials", *Construction & Building Materials*, 19 (6) 454-459.

[16] Naderi, M. (2011). "An alternative method for in situ determination of rock strength, *Can. Geo tech. J.* 48: 1901-1905

[17] Naderi, M. (2006). "Evaluating in situ shear strength of bituminous pavements". *Proceedings of the institution of Civil Engineering*, pp 61-65, 2006.

[18] Naderi, M. (2005). "Friction-Transfer Test for the Assessment of in-situ Strength & Adhesion of Cementitious Materials", *Construction & Building Materials*, 19(6) 454-459.

[19] Naderi, M. (2013). "New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength." *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, 7 (2), 438-447.

[20] A. Maryoto, (2019) The Effect of Compaction Method on Compressive Strength of Self Compacting Concrete in Laboratory. 1st International Conference on Material Science and Engineering for Sustainable Rural Development, AIP Conf. Proc. 2094, 020002-1 – 020002-7.

[21] M. Tuncan, O. Arioz, K. Ramyar, and B. Karasu, (2014) Effect of Compaction on Assessed Concrete Strength. pp. 847-853.

[22] R.A. Junior, M.G. Lima, and A. Oliveira, (2018) Influence of different compacting method on concrete compressive strength. *Journal of Materials*, Rio de Janeiro, vol. 23, no.3.

[23] Neville, A.M. (2012) *Properties of concrete*, fifth ed., Harlow, United Kingdom.

[24] G.P., Tilly, J., Jacobs, (2007) "Concrete repairs: Observations on performance in service and current practice". Watford, UK.

[25] G., Martinola, H., Sadouki, F., Wittmann, (2001) "Numerical model for minimizing the risk of damage in a repair system", *J. Mater. Civ. Eng.*, 13, 121–129.

[26] W. Zhang, M. Zakaria, Y. Hama, (2013) Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 500-510.

[27] M.F.bin, .H.M. Zain, (1996) The study on the physical properties of surface layer concrete under the influence of medium temperature environments, Kyushu university, Ph.D thesis.

[28] H., Beushausen, M., Alexander, (2007) "Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage", *Mater. Struct*, 40, 189–199.

[29] Naderi, M. (2008) Adhesion of Different Concrete Repair Systems Exposed to Different Environments, *J. Adhesion*. 84 78-104.

[30] M. Santandrea, I. A. O. Imohamed, H. Jahangir, C. Carloni, C. Mazzotti, S. De Miranda, and P. Casadei, (2016) An investigation of the debonding mechanism in steel FRP-and FRCM-concrete joints. In 4th Workshop on the new boundaries of structural concrete 289-298.

[31] M. Bagheri, A. Chahkandi, and H. Jahangir, (2019) Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers. *International Journal of Civil Engineering*, 17(11) 1785-1797.

[32] H. Jahangir, and M. R. Esfahani, (2020) Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour. *Steel and Composite Structures*, 34(6) 877-889.

[33] ASTM C136, (2006) Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.

[34] 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.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 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.

[38] Courard, L. (2000) "Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products", *Journal of materials and structures*, 33, 65.