

The effect of protective coating on the bond strength of CFRP sheets in some environmental conditions

Mahmood Naderi^{1*}, Roza Rahbari²

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

2 -Ph.D. Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Reliable long-term bond durability is required in order to have successful performance of concrete structures reinforced with CFRP sheets. In this paper, the results of investigating the effect of using protective coating applied on CFRP sheets in increasing the strength and bond durability of these sheets under acute environmental conditions are presented. The environmental conditions considered are: wet-drying cycles, freeze-thaw and temperature changes. The results show that the bond durability of CFRP-reinforced specimens without protective layer is reduced by 24, 40 and 75% under cyclic conditions of temperature change, wet-dry and freeze-thaw. In order to protect CFRP sheets, four types of mortar were used, consisting of cement-based fiber mortar, fiber mortar with air Entrainment, cement-sand mortar containing epoxy adhesive and epoxy-based waterproof mortar were applied on their surface. Tests performed include measuring the bond strength using the "pull-off" and "twist-off" methods, as well as determining the compressive strength of the protective coating mortars, before and after exposing specimens to acute conditions. The results obtained tend to indicate that the proper selection of protective coating had a significant impact on the performance and bond durability of the CFRP coated concrete cubes that were under harsh environmental condition. By applying these coatings on concrete specimens reinforced with CFRP sheets, under conditions of temperature change, wet-drying and freeze-thaw, the bond strength increased by 12%, 22% and 84% compared to the specimens without protective coating.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 July 2020

Revise Date: 03 September 2020

Accept Date: 30 September 2020

Keywords:

Protective coating layer
CFRP sheet
Bond strength
"pull-off"
"twist-off"
Harsh environmental
conditions

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.239293.2189>

*Corresponding author: Mahmood Naderi

Email address: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

تاثیر پوشش محافظ بر مقاومت چسبندگی ورق های CFRP در بعضی شرایط محیطی

محمود نادری^{۱*}، رزا رهبری^۲

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

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

چکیده

برای عملکرد موفق سازه های بتنی تقویت شده با ورق های CFRP، مقاومت چسبندگی بلندمدت قابل اعتمادی مورد نیاز است. در این مقاله نتایج بررسی تاثیر استفاده از پوشش محافظ اعمال شده بر روی ورق های CFRP در افزایش مقاومت و چسبندگی این ورق ها تحت شرایط محیطی حاد ارایه گردیده است. شرایط محیطی در نظر گرفته شده عبارتند از: چرخه های تر و خشک شدگی، یخ و ذوب یخ و تغییرات دما. نتایج حاصله حاکی از آن است که مقاومت چسبندگی نمونه های تقویت شده با ورق CFRP بدون لایه محافظ، به میزان ۲۴، ۴۰ و ۷۵ درصد در ۳۰۰ سیکل اعمال شرایط چرخه ای تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ کاهش می یابد. به منظور محافظت از ورق های CFRP و ماتریس چسب چهار نوع ملات الیافی پایه سیمانی، ملات الیافی حاوی ماده هوزا، ملات ماسه سیمان حاوی چسب اپوکسی، ملات آببند پایه اپوکسی بر روی سطح آن ها اجرا گردید. آزمایش های انجام شده شامل اندازه گیری مقاومت چسبندگی با بکارگیری روش های "کشیدن از سطح" و "پیچش" و همچنین تعیین مقاومت فشاری ملات های پوششی محافظ، قبل و بعد از قرار گرفتن نمونه ها تحت شرایط حاد می باشند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که انتخاب مناسب پوشش محافظ تاثیر قابل ملاحظه ای بر افزایش دوام و عملکرد چسبندگی نمونه های تقویت شده با CFRP تحت هر یک از شرایط حاد محیطی داشته است. بطوریکه با اعمال این پوشش ها در نمونه های بتنی تقویت شده با ورق های CFRP، تحت ۳۰۰ سیکل اعمال شرایط تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ مقاومت چسبندگی به میزان ۱۲٪، ۲۲٪ و ۸۴٪ نسبت به نمونه های بدون پوشش محافظ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: پوشش محافظ ورق های CFRP، مقاومت چسبندگی، "کشیدن از سطح"، "پیچش"، شرایط حاد محیطی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.239293.2189	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/jsce.2020.239293.2189	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۳۹۹/۰۶/۱۳	۱۳۹۹/۰۴/۲۳	
محمود نادری Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر یکی از روش‌های رایج مقاوم سازی سازه‌های بتن آرمه استفاده از ورق‌های FRP می باشد. این ورق‌ها به دلیل داشتن خواص مطلوبی همچون مقاومت کششی بالا، وزن سبک و مقاومت در برابر خوردگی محبوبیت زیادی کسب کرده است. بر اساس تحقیقات انجام شده، اتصال مناسب ورق FRP به بتن موجب افزایش قابل توجه مقاومت و سرویس‌دهی سازه‌های بتنی می‌گردد [۱]. مشاهدات نشان داده است که تنش‌ها بین لایه FRP و بستر بتنی از طریق چسب منتقل می‌شوند، در صورتی که مکانیسم انتقال تنش به دلیل از بین رفتن پیوند آن‌ها از بین رود، شکست زودرس اتفاق می‌افتد. به عبارتی در این حالت قبل از اینکه ورق FRP به ظرفیت کششی نهایی خود برسد، جداشدگی از سطح بتن رخ می‌دهد. جداشدگی به عنوان اصلی‌ترین حالت شکست شناخته شده بوده و بنابراین در طراحی سیستم‌های تقویت کننده دارای اهمیت زیاد است. از جمله ویژگی‌های ورق‌های FRP، مقاومت در برابر شرایط حاد محیطی شبیه محیط دریایی می‌باشد، زیرا وجود شرایط حاد محیطی، موجب تخریب چسبندگی بین FRP و بتن می‌گردد. مطالعات نشان داده است که در صورت قرار گرفتن سیستم FRP و بتن در معرض رطوبت در یک بازه زمانی، مقاومت چسبندگی این ورق‌ها به دلیل جدا شدگی سطحی کاهش می‌یابد [۲]. آیین نامه‌های طراحی برای تخمین عملکرد طولانی مدت این ورق‌ها در شرایط حاد محیطی ضرایب کاهش را پیشنهاد داده‌اند. به عنوان نمونه در آیین نامه ACI 440 2R ضریب کاهش ۰/۸۵ برای محدود کردن کرنش به منظور جلوگیری از جداشدگی ورق CFRP توصیه شده است [۳]. در ادامه تعدادی از تحقیقات انجام شده بر روی دوام مصالح FRP تحت شرایط محیطی حاد آورده شده است.

بلاربی و همکاران به بررسی شرایط محیطی مختلف بر روی رفتار طولانی مدت ستون‌های بتنی مسلح تقویت شده با ورق‌های کربن/اپوکسی ۱ و شیشه/اپوکسی ۲ پرداختند. در بین سیکل‌های طراحی شده در این تحقیق آب شور با ۵٪ نمک تاثیر زیادی بر کاهش بار نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده با ورق شیشه/اپوکسی داشته است [۴]. در تحقیق انجام شده بر روی نمونه‌های دورپیچ شده با ورق کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی بیشترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه‌های دورپیچ شده با ورق شیشه/اپوکسی در محیط با دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد به همراه سیکل تر و خشک آب شور با ۳٪ نمک بوده است [۵]. در مطالعاتی که به بررسی اثر آب شور با ۵٪ نمک بر دوام مصالح FRP اختصاص داشت، مشخص شد که تماس با آب شور (۵٪ نمک) موجب کاهش شدید مقاومت ستون‌های تقویت شده با ورق‌های شیشه/اپوکسی شده است. همچنین در مواجهه با آب شور (۵٪ نمک) اولین اثر تخریبی از ناحیه رطوبت بوده، این در حالیست که تشکیل کریستال‌های نمک داخل میکرو ترک‌ها موجب تخریب این ورق‌ها شده است [۶].

خواص انواع کامپوزیت‌ها از قبیل الیاف کربن، شیشه و آرامید که به مدت ۲۰ روز در آب با دمای ۲۳+ و ۷۰+ درجه سانتی‌گراد مستغرق بودند توسط گوپالان و همکاران، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که آب در بین سطح مشترک الیاف و رزین و در فضاهای خالی نفوذ می‌نماید [۷]. دوام مواد کامپوزیتی تحت شرایط محیطی مختلف توسط بانک و همکاران بررسی گردید. در مطالعه ذکر شده اثرات تغییرات مختلف دما، رطوبت و ترکیبات شیمیایی نیز در نظر گرفته شد که موجب کاهش عملکرد بلند مدت مواد کامپوزیتی گردید [۸]. در مطالعه آزمایشگاهی با قرار دادن نمونه‌های FRP در آب شور حاوی ۵٪ نمک مشاهده شد که این محیط اثر تخریبی زیادی بر روی خواص مکانیکی این مصالح داشته است. همچنین اثر تخریبی این محیط با افزایش دما بیشتر مشاهده شده است [۹]. همچنین مطالعه‌ی عملکرد لایه‌های FRP در دمای پایین (تا دمای ۲۹- درجه سانتی‌گراد) نشان داد که الیاف کربن و شیشه در دمای پایین (۲۹- درجه سانتی‌گراد) به نسبت الیاف‌های دیگر، مصالح مناسب‌تری می‌باشند [۱۰].

در مطالعه انجام شده توسط پن و همکاران اثرات چرخه‌ای یخ و ذوب یخ (۲۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ساعت، ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ساعت) بر چسبندگی بین ورق CFRP و بتن با استفاده از آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد فرایند یخ و ذوب یخ انرژی شکست و مقاومت چسبندگی را کاهش می‌دهد. در مطالعه آزمایشگاهی مقاومت کششی ورق‌های CFRP تقویت کننده بتن تحت شرایط یخ و ذوب یخ بررسی شد. نتایج حاکی از کاهش ۸۴٪ مقاومت کششی ورق CFRP پس از ۱۰۰

1 CFRP

2 GFRP

سیکل یخ و ذوب یخ بود [۱۱]. بر اساس مطالعات انجام شده در شرایط یخ و ذوب یخ عمق ترک و طول موثر پیوند با افزایش تعداد چرخه-های یخ و ذوب یخ افزایش می‌یابد و بنابراین مقاومت چسبندگی، سختی و انرژی شکست را تحت تاثیر قرار می‌دهد. وجود مولکول‌های آب در ناحیه پیوند ورق FRP/بتن اثرات مخرب یخ و ذوب یخ را تشدید می‌کند. بر اساس مطالعات انجام شده ۵۰ چرخه یخ زدگی در آب منجمده کاهش ۸۲ درصدی در انرژی شکست پیوند CFRP/بتن می‌گردد [۱۲]. مطالعات انجام شده بر پیوند ورق CFRP/فولاد نشان می‌دهد پس از اعمال ۸ ماه چرخه تر و خشک شدگی در آب شور حاوی ۵٪ نمک، مقاومت چسبندگی ورق CFRP/فولاد به میزان ۴۷٪ کاهش می‌یابد [۱۳]. در مطالعه آزمایشگاهی مقاومت کششی الیاف کربن، شیشه، بازالت و ورق‌های FRP هیبریدی در شرایط اعمال چرخه‌های یخ و ذوب یخ بررسی شد. نتایج نشان داد که ورق‌های FRP هیبریدی و بازالت در مقایسه با ورق‌های کربن و شیشه مقاومت بهتری دارند. همچنین رفتار کششی الیاف شیشه در مقایسه با دیگر ورق‌های مورد آزمایش به چرخه‌های یخ و ذوب یخ حساسیت بیشتری نشان داد [۱۴]. در مطالعه‌ای مقاومت برشی ورق‌های CFRP تک جهتی و رزین اپوکسی در محدوده دمایی ۴۰- تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به دو روش چسباندن به روش خیس و اتصال با چسب مورد آزمایش قرار گرفتند و رابطه تجربی برای ارزیابی بار شکست ارائه گردید. نتایج تحلیلی و تجربی کاهش تدریجی مقاومت را در این محدوده دمایی نشان داد [۱۵]. حالت‌های شکست پیوند بین ورق CFRP و بتن تحت چرخه‌های یخ و ذوب یخ (دما از ۱۸- درجه تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) در آب و در هوا توسط لیو و همکاران بررسی شد. برای ارزیابی عملکرد پیوند بتن CFRP/بتن از آزمایش برش تک لبه استفاده شد. طبق نتایج بدست آمده چرخه‌های یخ و ذوب یخ در آب باعث شد که حالت گسیختگی از شکست در بتن بستر به شکست در سطح مشترک بتن/چسب تغییر کند. در حالیکه چرخه‌های یخ و ذوب یخ در هوا تاثیری بر حالت گسیختگی نداشت و محل گسیختگی تا ۲۷۰ سیکل همچنان در بتن بستر بود [۱۶]. مطالعات انجام شده بر روی مقاومت چسبندگی برشی و کششی CFRP/بتن تحت شرایط غوطه وری در آب به مدت ۱۸ ماه نشان داد مقاومت برشی و کششی به ترتیب حداکثر به میزان ۲۵٪ و ۴۱٪ کاهش می‌یابد [۱۷]. در مطالعات انجام شده توسط رئوف و همکاران مقاومت چسبندگی برشی FRP/بتن و نوعی ماده کامپوزیتی پایه سیمانی به نام ملات TMR/بتن تحت شرایط تغییرات دما با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده نمونه‌های مسلح شده با ملات TMR در آزمایش برش مستقیم عملکرد بسیار خوبی در دمای بالا (تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارند، بطوریکه تا ۸۵٪ از مقاومت خود را تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ کردند. در حالیکه این مقدار برای نمونه‌های تقویت شده با FRP تنها ۱۷٪ و در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱۸].

نتایج بدست آمده حاکی از کاهش چسبندگی ورق‌های CFRP به بتن در مواجهه با شرایط محیطی مخرب است. در این مقاله، به بررسی عملکرد پوشش‌های محافظ اعمال شده بر روی ورق‌های CFRP، به عنوان راهکاری کم هزینه برای افزایش دوام این ورق‌ها پرداخته شده است. روش تحقیق مبتنی بر روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. روند کلی کار به این صورت بود که نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ در معرض شرایط حاد محیطی از جمله سیکل‌های یخ و ذوب یخ، تغییرات دما و تر و خشک شدگی قرار داده شدند. سپس با دو روش آزمایش "کشش مستقیم" و "پیچش"، مقاومت چسبندگی و شکل گسیختگی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۱- آزمایش کشش از سطح (pull-off)

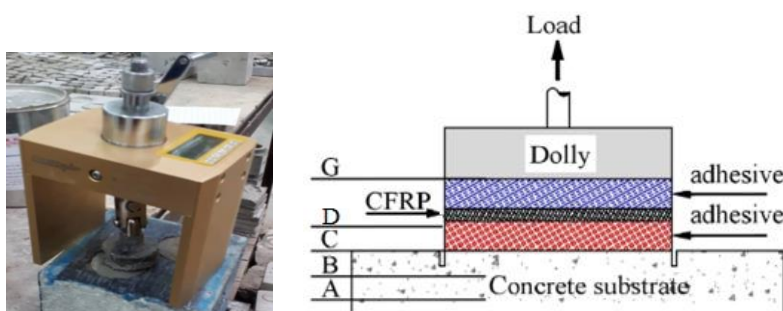
آزمایش کشش از سطح یکی از روش‌های دقیق ارزیابی مقاومت چسبندگی کششی، آزمایشی ساده و قابل تکرار است. از آزمایش کشش مستقیم می‌توان برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی سیستم‌های تقویت کننده بتن، اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن و تخمین مقاومت چسبندگی پوشش‌های اعمال شده بر روی بسترهای مختلف استفاده کرد. مطابق استاندارد ASTM D7522 [۱۹] همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این آزمایش، ابتدا مغزه‌گیری جزئی به قطر ۶ تا ۱۱ میلی‌متر داخل لایه بتن بستر انجام می‌گیرد. سپس

یک استوانه فلزی به قطر ۵ سانتی متر بر روی مغزه چسبانده شده و با استفاده از دستگاه کشش از سطح کشیده می شود تا دچار شکست شود. تنش ایجاد شده در سطح تماس بین بتن بستر و لایه تقویتی روی آن مطابق رابطه (۱) بدست می آید.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، P نیروی کششی نهایی (شکست) و A مساحت تماس استوانه (دایره ای به قطر ۵ سانتی متر) می باشد. نتایج تحقیقات حاکی از کاهش مقاومت چسبندگی با افزایش عمق مغزه گیری جزئی می باشد. این کاهش مقاومت عمدتاً به دلیل تمرکز تنش در ناحیه مغزه گیری شده و همچنین عدم مشارکت بتن در نواحی اطراف مغزه می باشد. با این وجود مغزه گیری جزئی موجب می شود سطح گسیختگی به نواحی داخلی بتن انتقال یابد و لذا از این طریق می توان عمق بیشتری از بتن را مورد ارزیابی قرار داد [۲۰]. در این تحقیق عمق مغزه مطابق استاندارد ASTM D7522 (بدون در نظر گرفتن ورق CFRP و پوشش های محافظ اعمال شده) ۵ میلی متر داخل بتن می باشد.

دو پارامتر اصلی مورد بررسی در آزمایش کشش از سطح، مقاومت چسبندگی و حالت گسیختگی نمونه ها می باشد. بر اساس طبقه بندی استاندارد ASTM D4541-09 [۲۱] حالت گسیختگی در آزمایش از سطح مطابق با جدول ۱ و شکل ۱ می باشد. در شکل ۱ سطح بین پوشش محافظ، ورق CFRP و بتن برای وضوح بهتر بزرگنمایی شده است.



شکل ۱: آزمایش "کشش از سطح"

جدول ۱: طبقه بندی مود های گسیختگی در آزمایش کشش از سطح [۲۱]

مود گسیختگی	نوع گسیختگی	علت گسیختگی
A	گسیختگی در بتن بستر	گسیختگی مطلوب.
B	ترکیبی از گسیختگی مود A و C	عمل آوری نادرست چسب، قسمتی از گسیختگی در بتن بستر و قسمتی از آن در چسب.
C	گسیختگی در ناحیه چسب	عمل آوری نادرست چسب، آلوده بودن سطح.
A/B	گسیختگی سطح بالایی بتن (نزدیک محل اتصال آن به FRP) و ماتریس	اثر تخریبی شرایط محیطی.
D	گسیختگی در محل اتصال FRP به چسب	عمل آوری نادرست چسب، آلوده بودن سطح، اثر تخریبی شرایط محیطی.
G	گسیختگی در ناحیه چسب دیسک	عمل آوری نادرست چسب، این مود گسیختگی قابل قبول نمی باشد.

۲-۲- آزمایش پیچش (twist-off)

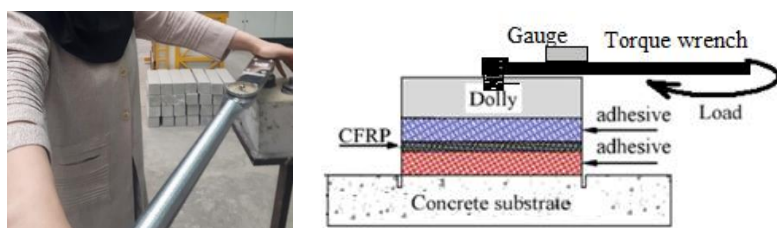
روش آزمون پیچش یک روش دقیق با کاربردی وسیع در تعیین مقاومت بتن و تعیین مقاومت چسبندگی برشی لایه های تعمیراتی هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه است و به عنوان یک تکنیک سریع، دقیق و کم هزینه با خرابی جزئی محسوب می شود [۲۲]. جذابیت این روش در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزئی و هزینه اندک انجام آن است. این آزمون در حالت های افقی، قائم و به طور کلی بر

روی هر سطح صافی به سادگی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی قبلی قابل انجام است. ابزار مورد استفاده در این آزمایش بسیار ساده و قابل دسترس است و انجام آزمایش نیز نیاز به مهارت قبلی ندارد. برای انجام آزمایش "پیچش" ابتدا آلودگی‌ها از سطح نمونه زدوده می‌شود. سپس صفحات فلزی با قطر ۵ سانتی‌متر توسط چسب اپوکسی بر روی مغزه‌های جزئی تعبیه شده چسبانیده می‌شود و پس از کسب مقاومت کافی توسط چسب، با استفاده از یک دستگاه پیچش سنج، لنگر پیچشی لازم جهت جدا کردن صفحه فلزی از سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

هدف از انجام این آزمایش در تحقیق حاضر بررسی مقاومت چسبندگی نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد. تنش برشی لازم برای جداشدگی را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) محاسبه نمود.

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (2)$$

که در آن τ تنش برشی حاصل از پیچش (N/m^2)، T گشتاور پیچشی ($N \cdot m$)، r شعاع صفحه فلزی (m)، J ممان اینرسی قطبی (m^4) است.



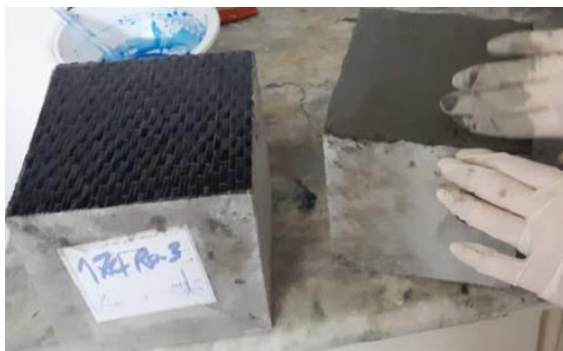
شکل ۲: آزمایش " پیچش "

۲-۳ - اندازه‌گیری مقاومت فشاری لایه محافظ

تعیین مقاومت فشاری هر یک از ملات‌های اعمال شده بر ورق CFRP، بر اساس استاندارد ASTM C109 [۲۳] به عمل آمد. بدین ترتیب که برای هر یک از پوشش‌های در نظر گرفته شده ۳ نمونه مکعبی ۵۰ میلی‌متری ساخته شد و پس از عمل‌آوری آن‌ها به مدت ۲۸ روز، مقاومت فشاری اندازه‌گیری شد. در شکل ۳ آزمایش مقاومت فشاری و در شکل ۴ روند آماده‌سازی نمونه‌ها نشان داده شده است. لازم به ذکر است آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شده است.



شکل ۳: آزمایش مقاومت فشاری



الف) نمونه های مکعبی ملات (ب) نمونه های بتنی تقویت شده با CFRP با و بدون پوشش محافظ
شکل ۴: نمونه های مورد آزمایش

۲-۴- مصالح بکار گرفته شده

در این تحقیق، مقاومت چسبندگی نمونه های بتنی مقاوم شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ساخت نمونه های بتنی سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تپ ۲ کارخانه آبیگ قزوین با وزن مخصوص (ton/m^3) ۳/۱۵ می باشد. طرح اختلاط نمونه ها در جدول ۲ ارائه شده است. درشت دانه شکسته مطابق با استاندارد ASTM-C33 [۲۴] با حداکثر دانه ۲۰ میلی متر و چگالی (kg/m^3) ۲/۶۵، وزن مخصوص (kg/m^3) ۱۶۹۰ و درصد جذب آب ۰/۶ و ریزدانه با مدول نرمی ۲/۹، چگالی (kg/m^3) ۲/۵۷ و درصد جذب آب ۰/۹ استفاده گردید. شن و ماسه مصرفی محصول معدن قدس ۱ واقع در شهریار بوده و قبل از ساخت نمونه ها سنگدانه های مصرف شده شسته و خشک گردیدند. برای اندازه گیری مقاومت چسبندگی با روش "کشش از سطح" و "پیچش" نمونه های بتنی ساخته شده، مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی متر می باشند. در جدول ۲ طرح اختلاط نمونه های بتنی آورده شده است. ورق های FRP بکار گرفته شده از نوع الیاف کربن (CFRP) می باشد که مشخصات آن طبق اطلاعات کارخانه سازنده در جدول ۳ آورده شده است. برای چسباندن ورق CFRP به سطح نمونه های بتنی از چسب دو جزئی که یک جزء آن رزین و جزء دیگر سخت کننده می باشد استفاده شده است. مشخصات این چسب طبق اطلاعات کارخانه سازنده در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲: طرح اختلاط نمونه های بتنی در یک متر مکعب

سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)
۴۰۰	۱۵۰	۸۰۰	۱۲۰۰

جدول ۳: مشخصات ورق های دارای الیاف کربن

مدول الاستیسیته الیاف (MPa)	۲۳۰۰۰۰
مقاومت نهایی (MPa)	۴۹۰۰
کرنش نهایی	۰/۰۱۶
ضریب انبساط حرارتی $(1/^\circ\text{C})$	$۰/۶ \times 10^{-۶}$

جدول ۴: مشخصات چسب بکار گرفته شده

زمان گیرش در دمای 21°C (ساعت)	۱۴
مقاومت کششی (MPa)	۵۵
مقاومت برشی (MPa)	۲۵
مدول الاستیسیته کششی (MPa)	۲۱۰۰
ضریب پواسون	۰/۳۵

برای رسیدن به پوشش محافظ مناسب، مصالح مختلفی مورد آزمایش قرار گرفتند تا از ترکیب آن ها ملاتی با ویژگی های مطلوب ایجاد شود. با انجام آزمایشات متعدد بر روی ملات های تشکیل شده، نهایتاً ۴ نوع ملات با نسبت های اختلاط جدول ۶ انتخاب شد. پوشش محافظ نوع اول ملات الیافی پایه سیمانی بوده که تحت شرایط تغییر دما از آن استفاده شده است. تحقیقات نشان می دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن خطر قلوه کن شدن بتن تحت دمای $160-180^\circ\text{C}$ درجه سانتی گراد را تا حد زیادی کاهش می دهد.

مقبول ترین تئوری در زمینه توجیه این پدیده، ذوب شدن الیاف در این محدوده دمایی و در نتیجه ایجاد فضا برای فشار ایجاد شده از بخار است [۲۵]. مطابق نتایج گزارش شده افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن، پوسته شدگی آن را در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد کاهش می-دهد [۲۶]. بنابراین برای شرایط تغییر دما از ملات پوششی دارای الیاف پلی پروپیلن استفاده گردید. مشخصات الیاف مورد استفاده در این ملات در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات الیاف پلی پروپیلن

وزن مخصوص (gr/cm ³)	قطر (μm)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (GPa)	ضریب انبساط حرارتی (1/°C)
۰/۹۱	۲۳	۵	۰/۵	۸×۱۰ ^{-۵}

برای شرایط تر و خشک شدگی از دو نوع ملات، یکی نوعی ملات آبنند پایه اپوکسی و دیگری ملات ماسه سیمان به همراه چسب اپوکسی استفاده شد.

دوام پوشش بتن در برابر سیکل های یخبندان و ذوب یخ از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. یکی از عواملی که در افزایش مقاومت در برابر سیکل یخ و ذوب یخ تاثیر بسزایی دارد مواد هوازا است. این مواد با ایجاد حباب های تصادفی فضای کافی برای انبساط آب درون بتن ایجاد می کنند و از فشار ایجاد شده ناشی از یخبندان درون بتن می کاهند [۲۷]. همچنین محقیقن بسیاری تاثیر الیاف بر مقاومت بتن در برابر پوسته پوسته شدن ناشی از چرخه های یخ و ذوب یخ را مورد ارزیابی قرار داده اند [۲۸, ۲۹]. از این رو در شرایط یخ و ذوب یخ از ملات پایه سیمانی دارای الیاف پلی پروپیلن و ماده هوازا به عنوان پوشش محافظ استفاده شد. جزئیات طرح اختلاط ملات های پوششی در جدول ۶ آورده شده است. در این تحقیق ضخامت تمامی ملات های پوششی اعمال شده بر ورق های CFRP ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد و پس از عمل آوری ورق CFRP بر روی آن اجرا گردید. به منظور افزایش استحکام پیوند بین ملات الیافی پایه سیمانی، ملات آبنند پایه اپوکسی، ملات الیافی حاوی ماده هوازا با ورق CFRP و زبر نمودن سطح، از ماسه سیلیسی بر روی سطح رزین مرطوب استفاده شد تا چسبندگی بهتری بین پوشش محافظ و ورق CFRP ایجاد شود. پس از عمل آوری ورق های CFRP، لایه پوشش محافظ بر روی آن ها اجرا گردید.

جدول ۶: طرح اختلاط ملات های استفاده شده به عنوان پوشش محافظ

نسبت اختلاط	ترکیبات	نام پوشش	شرایط محیطی
۶	ماده چسباننده پایه سیمانی	ملات الیافی پایه سیمانی	تغییرات دما
	الیاف		
	آب		
۴/۵	ماده چسباننده پایه اپوکسی	ملات آبنند پایه اپوکسی	تر و خشک شدگی
	رزین		
	سیمان		
۳	ماسه استاندارد ۱۶۱	ملات ماسه سیمان حاوی چسب	تر و خشک شدگی
	چسب پایه اپوکسی		
	آب		
۶	ماده چسباننده پایه سیمانی	ملات الیافی حاوی ماده هوازا	یخ و ذوب یخ
	الیاف		
	آب		
	ماده هوازا		

در جدول ۷ مقاومت فشاری و کششی هر یک از پوشش های محافظ پس از ۲۸ روز عمل آوری آورده شده است.

جدول ۷: مشخصات مکانیکی پوشش های محافظ

نام پوشش	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
ملات الیافی پایه سیمانی	۴۵	۱۰/۱
ملات آئیند پایه اپوکسی	۳۷/۲	۵/۴
ملات ماسه سیمان حاوی چسب	۴۵/۷	۸/۱
ملات الیافی حاوی ماده هوازا	۴۳/۴	۹/۸

۲-۵ - شرایط محیطی در نظر گرفته شده

قبل از انجام آزمایش، نمونه‌های ساخته شده تحت چرخه‌های مختلف تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ قرار داده شدند. به منظور اعمال سیکل تغییرات دمایی، دمای متغیر $+۶۰$ تا $+۲۰$ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. نمونه‌های اشاره شده به مدت ۶ ساعت در دمای $+۶۰$ درجه و سپس به مدت ۶ ساعت در دمای $+۲۰$ درجه قرار داده شدند. برای سیکل تر و خشک، نمونه‌ها پس از عمل‌آوری اولیه، به درون آب شرب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انتقال داده و به مدت ۶ ساعت درون آب شرب نگه داشته شدند، سپس برای خشک شدن به مدت ۶ ساعت درون اون با دمای $+۶۰$ درجه قرار گرفتند. بر اساس استاندارد ASTM-C666 [۳۰] دو روش برای سنجش مقاومت در برابر یخ زدگی وجود دارد. در یک روش، یخ زدن و ذوب شدن در آب صورت می‌گیرد و در روش دیگر یخ زدن در هوا و ذوب شدن در آب انجام می‌شود. در هر دو روش، یخ زدن و آب شدن تا ۳۰۰ سیکل انجام می‌شود. به منظور اعمال چرخه یخ و ذوب یخ، نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت درون فریزر با دمای -۱۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا یخ زده و سپس به مدت ۶ ساعت درون آب با دمای $+۴/۵$ درجه سانتی‌گراد خیس‌انده شده تا فرایند ذوب یخ صورت گیرد. در شکل ۵ نحوه اعمال هر یک از شرایط حاد محیطی نشان داده شده است.



ج) تر و خشک شدگی



ب) یخ و ذوب یخ



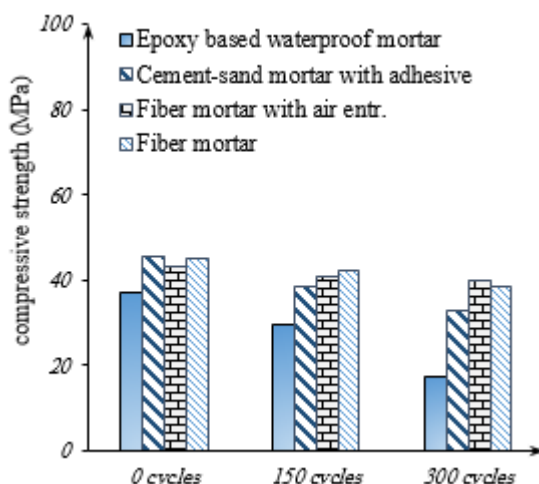
الف) تغییرات دما

شکل ۵: اعمال شرایط حاد محیطی

۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث پیرامون آنها

۳-۱ - مقاومت فشاری ملات پوششی

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C109 بر روی نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری در سن ۲۸ روز انجام شد. شکل ۶ و جدول ۸ میانگین نتایج بر روی سه نمونه را برای هر یک از پوشش‌های در نظر گرفته شده در سیکل‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ شرایط محیطی و نمونه کنترل در شرایط نرمال آزمایشگاهی (۰ سیکل) مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۶: مقاومت فشاری ۲۸ روزه پوشش‌های محافظ تحت سیکل‌های مختلف شرایط محیطی

جدول ۸: تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه پوشش‌های محافظ تحت سیکل‌های مختلف شرایط محیطی

نام پوشش	مقاومت فشاری (MPa)		
	نمونه کنترل	سیکل ۱۵۰	سیکل ۳۰۰
ملات الیافی پایه سیمانی	۴۵	۴۲/۱ (۶/۴) ^۱	۳۸/۵ (۱۴/۴) ^۱
ملات آببند پایه اپوکسی	۳۷/۳	۲۹/۸ (۱۹/۸) ^۱	۱۷/۳ (۵۳/۵) ^۱
ملات ماسه سیمان حاوی چسب	۴۵/۷	۳۸/۵ (۱۵/۷) ^۱	۳۲/۷ (۲۸/۴) ^۱
ملات الیافی حاوی ماده هوازا	۴۳/۴	۴۱ (۵/۵) ^۱	۳۹/۸ (۸/۲) ^۱

^۱ مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل (شرایط نرمال آزمایشگاهی) می‌باشد.

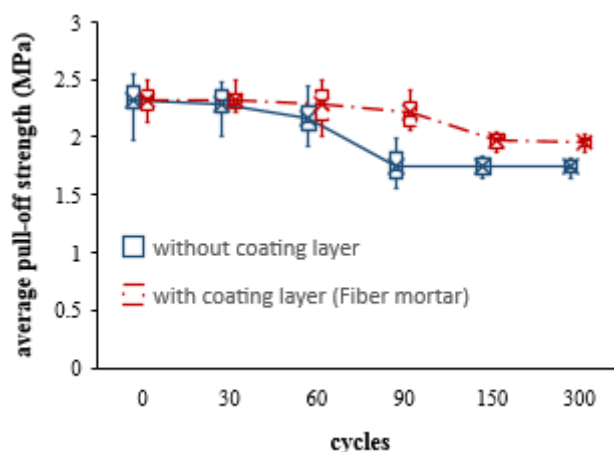
مطابق با نتایج جدول ۸، در شرایط نرمال آزمایشگاهی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات الیافی، ملات ماسه سیمان با چسب و ملات الیافی با ماده هوازا به ترتیب برابر با ۴۵/۷، ۴۳/۴ و ۴۱ مگاپاسکال بدست آمد که بسیار به هم نزدیک می‌باشند. ملات آببند پایه اپوکسی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۷ مگاپاسکال کمترین مقاومت فشاری را در شرایط نرمال آزمایشگاهی در مقایسه با سه نوع پوشش دیگر دارد. با توجه به شکل ۶ و جدول ۸، در سیکل ۱۵۰م مقاومت فشاری ملات الیافی در شرایط تغییر دما ۶٪ و ملات الیافی حاوی هوازا در شرایط یخ و ذوب یخ ۵٪ کاهش یافته است. با توجه به اثرات تخریبی شدیدتر شرایط یخ و ذوب یخ نسبت به شرایط تغییر دما می‌توان به این نتیجه رسید که با افزودن مقدار مناسب ماده هوازا می‌توان مقاومت ملات الیافی را تحت شرایط یخ و ذوب یخ به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. همچنین بیشترین کاهش مقاومت فشاری در این سیکل مربوط به پوشش آببند پایه اپوکسی با ۲۰٪ کاهش می‌باشد. همانطور که در جدول ۸ ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری پوشش الیافی تحت شرایط تغییر دمایی در سیکل پایانی ۳۰۰، ۱۴/۴٪ افت کرده است. این در حالیست که پوشش الیافی حاوی ماده هوازا تحت شرایط یخ و ذوب در این سیکل به میزان ۸٪ کاهش داشته است. مقاومت فشاری پوشش آببند پایه اپوکسی تحت شرایط تر و خشک شدگی در سیکل ۳۰۰ با ۵۳/۵٪ کاهش نسبت به شرایط نرمال آزمایشگاهی به مقدار ۱۷/۳ مگاپاسکال رسید. بر اساس نتایج گزارش شده در مرجع [۳۱] وجود ریزترک‌های ناشی از جمع شدگی تحت اعمال شرایط حاد محیطی مقاومت فشاری را ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان کاهش ۵۳ درصدی مقاومت فشاری در این پوشش را تحت اعمال ۳۰۰ سیکل تر و خشک شدگی ناشی از وجود ریزترک‌ها دانست. مقاومت فشاری پوشش ماسه سیمان حاوی چسب در شرایط مشابه تر و خشک شدگی در ۳۰۰ سیکل به ۳۲/۷ مگاپاسکال رسیده است. به عبارت دیگر شرایط تر و خشک شدگی موجب کاهش مقاومت فشاری این ملات به اندازه ۱۵/۷٪ و ۲۸/۴٪ در سیکل ۱۵۰ و ۳۰۰ شده است. با مقایسه مقاومت دو ملات آببند پایه اپوکسی و ملات ماسه سیمان حاوی چسب در سیکل‌های مختلف تر و خشک شدگی می‌توان به این نتیجه رسید که ملات ماسه سیمان حاوی چسب با توجه به کاهش کمتر مقاومت فشاری در تمامی سیکل‌های اعمالی نسبت به ملات آببند پایه اپوکسی ملات پوششی مناسب‌تری می‌باشد.

۳-۲- آزمایش کشش از سطح (pull-off)

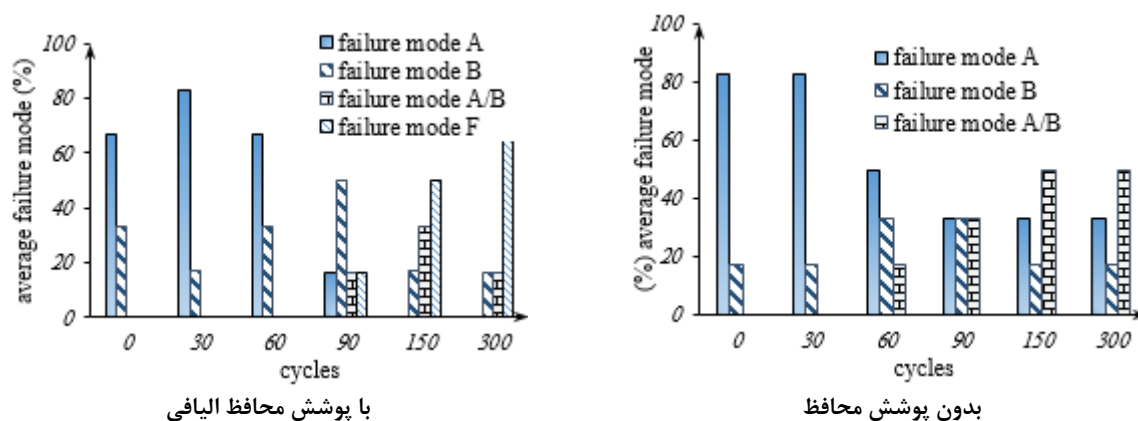
دو پارامتر اصلی مورد بررسی در آزمایش کشش از سطح، مقاومت چسبندگی و مود گسیختگی نمونه‌ها می‌باشد. در زیر این دو پارامتر برای نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ تحت سیکل‌های تغییرات دمایی، یخ و ذوب یخ و تر و خشک شدگی تحلیل و بررسی شده است.

الف- تغییر دما

در شکل ۷ میانگین مقاومت چسبندگی و در شکل ۸ درصد مودهای گسیختگی مشاهده شده تحت اعمال سیکل‌های مختلف تغییرات دما نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در هر سیکل میانگین ۶ تکرار آزمایش کشش از سطح می‌باشد.



شکل ۷: میانگین مقاومت چسبندگی تحت شرایط محیطی تغییر دما، حاصل از آزمایش "کشش از سطح".



شکل ۸: درصد مودهای گسیختگی مشاهده شده تحت شرایط محیطی تغییر دما، حاصل از آزمایش "کشش از سطح".

در جدول ۹ تغییرات مقاومت چسبندگی و مود غالب گسیختگی در هر سیکل شرایط تغییر دما، برای نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP با و بدون پوشش محافظ نشان داده شده است.

جدول ۹: میانگین مقاومت چسبندگی و مود غالب گسیختگی حاصل از آزمایش کشش از سطح تحت شرایط تغییر دما

مود غالب گسیختگی	مقاومت چسبندگی (MPa)	سیکل	
بتن بستر (مود A)	۲/۳۲	نمونه کنترل	
بتن بستر (مود A)	۲/۲۱(۱/۲۵) ^۱	۳۰	
بتن بستر (مود A)	۲/۱۶(۶/۶۷) ^۱	۶۰	بدون پوشش
بتن بستر (مود A)، ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)	۱/۷۵(۲۴/۴۴) ^۱	۹۰	محافظ
سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)	۱/۷۴(۲۴/۸۱) ^۱	۱۵۰	
سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)	۱/۷۴(۲۴/۹۲) ^۱	۳۰۰	
بتن بستر (مود A)	۲/۳۲	نمونه کنترل	
بتن بستر (مود A)	۲/۳۲(۰) ^۲	۳۰	
بتن بستر (مود A)	۲/۲۸(۲/۰۱) ^۲	۶۰	با پوشش
ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)	۲/۲۱(۴/۹۷) ^۲	۹۰	محافظ الیافی
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۹۷(۱۵/۲) ^۲	۱۵۰	
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۹۶(۱۵/۸۶) ^۲	۳۰۰	

^۱مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل بدون پوشش محافظ می‌باشد.
^۲مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ الیافی می‌باشد.

همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، در نمونه کنترل (شرایط نرمال آزمایشگاهی)، برای هر دو نوع نمونه با پوشش محافظ و بدون پوشش محافظ مود غالب گسیختگی، شکست بتن بستر (A) است که مطابق استاندارد ASTM D4541-09 گسیختگی مطلوب می‌باشد و بیانگر چسبندگی کامل پوشش محافظ به ورق CFRP و ورق به بتن می‌باشد. تا سیکل ۶۰ام روندی مشابه با نمونه کنترل در مود گسیختگی مشاهده شده است، که نشان دهنده دوام و عملکرد مناسب ورق CFRP و پوشش محافظ روی آن در برابر تغییرات دمایی می‌باشد. از طرفی با توجه به شکل ۷ مقاومت چسبندگی در نمونه بدون پوشش محافظ تا سیکل ۶۰ نسبت به شرایط نرمال آزمایشگاهی با ۶٪ کاهش به ۱/۷۵ مگاپاسکال و در نمونه با پوشش محافظ با کاهش اندک ۲٪ به ۲/۲۸ مگاپاسکال رسیده است. تحت سیکل ۹۰ شرایط تغییر دما، در نمونه با پوشش محافظ در یکی از نمونه‌ها جداسازی پوشش محافظ از ورق CFRP مشاهده شد، اما با این حال مود غالب گسیختگی در این سیکل ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B) می‌باشد. در همین مود کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به شرایط نرمال آزمایشگاهی در نمونه بدون پوشش و با پوشش به ترتیب ۲۴٪ و ۵٪ می‌باشد. با افزایش تعداد سیکل‌های اعمال شده بر نمونه‌ها در سیکل‌های پایانی (سیکل ۱۵۰ و ۳۰۰) مود غالب گسیختگی شکست در سطح بالایی بتن و ماتریس در نمونه بدون پوشش محافظ و شکست در مرز اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F) در نمونه با پوشش محافظ می‌باشد. کاهش مقاومت چسبندگی (۲۴٪) در نمونه بدون پوشش محافظ تا سیکل ۹۰ ادامه دارد و پس از آن به مقدار ثابتی می‌رسد. این در حالی است که در نمونه با پوشش محافظ تا سیکل ۱۵۰ کاهش مقاومت به ۱۵٪ رسیده و ثابت می‌ماند. شاید بتوان دلیل ثابت شدن مقاومت چسبندگی در سیکل‌های پایانی را به تعادل رسیدن میزان کاهش مقاومت سیستم و درصدهای شکست در بتن، مرز بین بتن و ورق CFRP در نمونه بدون پوشش محافظ و مرز بین پوشش محافظ و ورق CFRP در نمونه با پوشش محافظ دانست. باید توجه داشت زمانی که نمونه‌های مورد آزمایش تحت دمای بالاتر از شرایط نرمال آزمایشگاهی قرار می‌گیرند، علاوه بر اینکه مصالح بکار گرفته شده شامل الیاف، چسب، عوامل تشکیل دهنده بتن و پوشش محافظ، دچار واکنش می‌شوند، اختلاف انبساط دمایی مصالح بکار گرفته شده نیز باعث ایجاد تنش‌های مخرب می‌گردد. در صورتی که این تنش‌ها از مقاومت متناظر موجود بیشتر گردد، باعث شکست خواهند شد و اگر به حد نهایی نرسند، تنش پسماندی که در اثر اعمال سیکل‌های دمایی بالا به وجود می‌آید، موجب کاهش مقاومت نهایی می‌گردد. همچنین چسب بکار گرفته شده

تحت تاثیر دمای بالای اعمالی دچار افت در ویژگی می شود و مقاومت چسبندگی نهایی را کاهش می دهد. در شکل ۹ انواع گسیختگی مشاهده شده تحت شرایط تغییر دما نشان داده شده است.

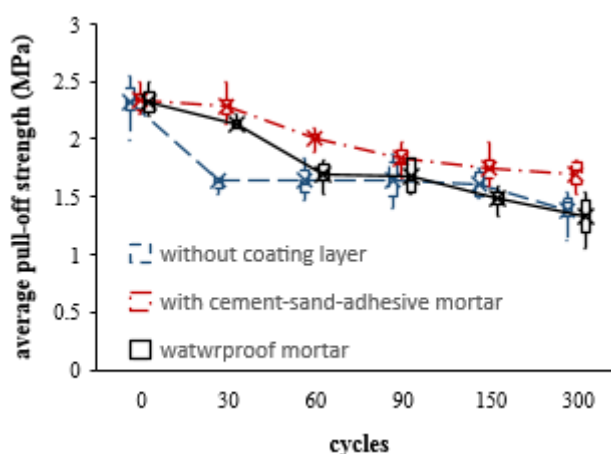


الف) نمونه بدون پوشش محافظ، گسیختگی در بتن بستر (مود A)
 ب) نمونه بدون پوشش محافظ، گسیختگی در سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)
 ج) نمونه با پوشش محافظ الیافی، ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)
 د) نمونه با پوشش محافظ الیافی، گسیختگی در محل اتصال پوشش محافظ به CFRP (مود F)

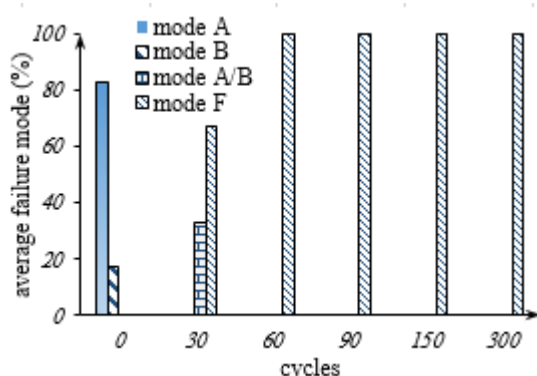
شکل ۹: انواع مود گسیختگی در نمونه تحت شرایط تغییر دما، حاصل از آزمایش "کشش از سطح"

ب- تر و خشک شدگی

در شکل ۱۰ میانگین مقاومت چسبندگی و در شکل ۱۱ درصد مودهای گسیختگی مشاهده شده تحت اعمال سیکل های مختلف تر و خشک شدگی نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در هر سیکل میانگین ۶ تکرار آزمایش کشش از سطح می باشد. نتایج نشان می دهد در نمونه تقویت شده با ورق CFRP بدون پوشش محافظ تحت اعمال ۳۰ سیکل شرایط تر و خشک شدگی مود غالب گسیختگی از شکست در بتن بستر، به ترکیب شکست در بتن بستر و چسب و پس از اعمال ۳۰ سیکل دیگر (سیکل ۶۰ام) به شکست در سطح بالایی بتن و ماتریس تبدیل می شود و تا سیکل پایانی ۳۰۰ گسیختگی غالباً به صورت شکست در سطح بالایی بتن و ماتریس باقی می ماند.

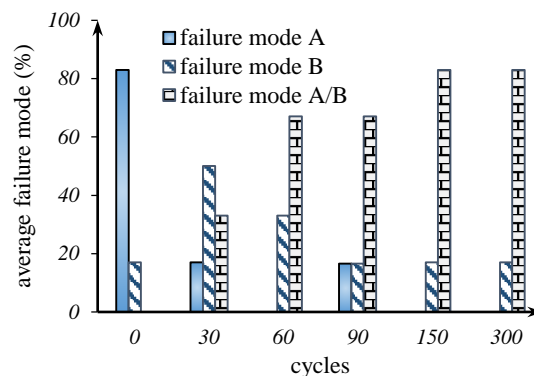


شکل ۱۰: میانگین مقاومت چسبندگی تحت شرایط محیطی تر و خشک شدگی، حاصل از آزمایش "کشش از سطح".

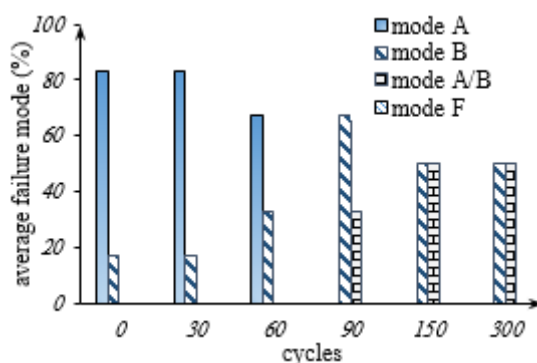


(ب) نمونه تقویت شده با CFRP با پوشش محافظ آبدبند پایه

اپوکسی



(الف) نمونه تقویت شده با ورق CFRP بدون پوشش محافظ



(ج) نمونه تقویت شده با ورق CFRP با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب

شکل ۱۱: درصد مودهای گسیختگی مشاهده شده تحت شرایط محیطی تر و خشک شدگی، حاصل از آزمایش "کشش از سطح".

کاهش مقاومت چسبندگی در این نمونه‌ها نیز از سیکل ۳۰ تا سیکل ۱۵۰ مقدار ثابت ۲۹٪ و در سیکل ۳۰۰ افزایش یافته و به مقدار ۴۰٪ می‌رسد. مطابق با استاندارد ASTM D4541-09 دلیل ظاهر شدن این مود گسیختگی اثرات تخریبی شرایط محیطی می‌باشد. از آنجا که اکثر رزین‌های بکار گرفته شده به عنوان چسب، حساسیت زیادی به رطوبت نشان می‌دهند، علت ظاهر شدن گسیختگی در سطح بالایی بتن و ناحیه اتصال به ورق CFRP می‌تواند به دلیل نفوذ رطوبت در سیکل‌های متوالی باشد. در جدول ۱۰ تغییرات مقاومت چسبندگی و مود غالب گسیختگی در هر سیکل شرایط تر و خشک شدگی، برای نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP با و بدون پوشش محافظ نشان داده شده است.

جدول ۱۰: میانگین مقاومت چسبندگی و مود غالب گسیختگی حاصل از آزمایش "کشش از سطح" تحت شرایط تر و خشک شدگی

مود غالب گسیختگی	مقاومت چسبندگی (MPa)	سیکل	
بتن بستر (مود A)	۲/۳۲	نمونه کنترل	
ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)	۱/۶۴(۲۹/۴۲) ^۱	۳۰	
سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)	۱/۶۴(۲۹/۴۲) ^۱	۶۰	بدون پوشش
سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)	۱/۶۵(۲۸/۷۷) ^۱	۹۰	محافظ
سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)	۱/۶۱(۳۰/۴۵) ^۱	۱۵۰	
سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)	۱/۳۹(۴۰/۱۰۱) ^۱	۳۰۰	
بتن بستر (مود A)	۲/۳۳	نمونه کنترل	
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۲/۱۴(۸/۱۴) ^۲	۳۰	
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۷(۲۶/۷۹) ^۲	۶۰	با پوشش محافظ
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۶۷(۲۸/۱۸) ^۲	۹۰	آبند پایه
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۴۸(۳۶/۲۴) ^۲	۱۵۰	اپوکسی
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۳۳(۴۲/۸۴) ^۲	۳۰۰	
بتن بستر (مود A)	۲/۳۳	نمونه کنترل	
بتن بستر (مود A)	۲/۲۹(۱/۹۳) ^۳	۳۰	
بتن بستر (مود A)	۲/۰۱(۱۳/۹۷) ^۳	۶۰	با پوشش محافظ
ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)	۱/۸۳(۲۱/۶۵) ^۳	۹۰	ماسه سیمان
ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)	۱/۷۵(۲۴/۹۳) ^۳	۱۵۰	حاوی چسب
محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)	۱/۷(۲۷/۲۶) ^۳	۳۰۰	

^۱مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل بدون پوشش محافظ می‌باشد.

^۲مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی می‌باشد.

^۳مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب می‌باشد.



د) نمونه با پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی، گسیختگی مرز اتصال پوشش محافظ به CFRP



ج) نمونه با پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی، گسیختگی در سطح بالایی بتن و ماتریس



ب) نمونه با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب، گسیختگی مرز اتصال پوشش محافظ به CFRP



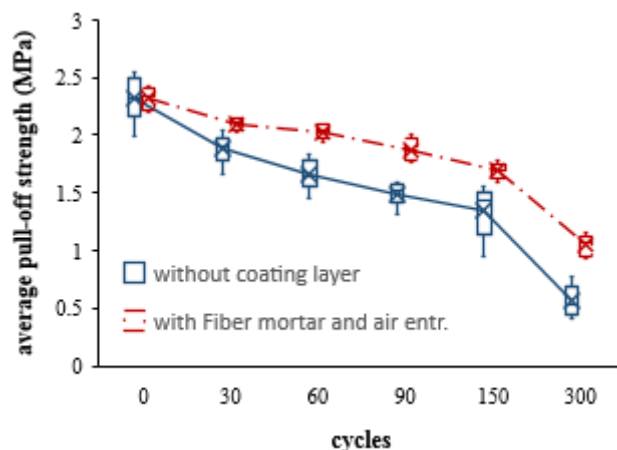
الف) نمونه با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب، گسیختگی در بتن بستر

شکل ۱۲: مودهای گسیختگی در نمونه تحت شرایط تر و خشک شدگی، حاصل از آزمایش کشش از سطح

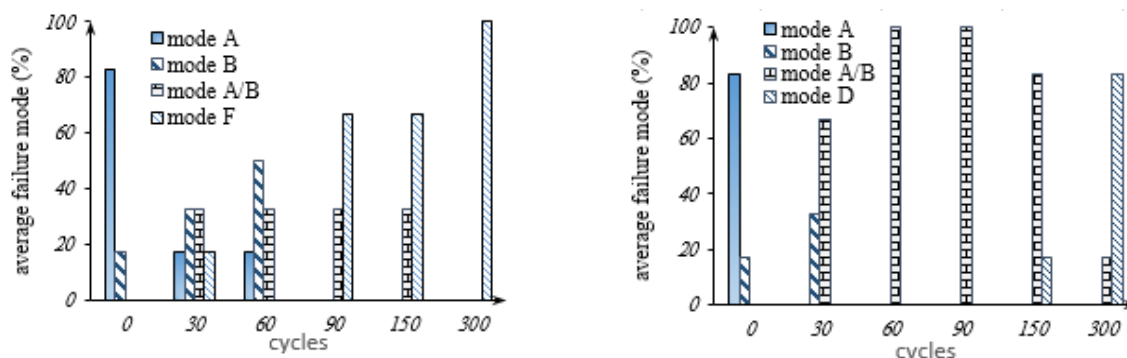
نکته قابل توجه تحت این شرایط محیطی سست شدن بافت پوشش محافظ در برخی از نمونه‌ها به دلیل وجود رطوبت در سطح جداشدگی می‌باشد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با اعمال پوشش محافظ آئیند پایه اپوکسی بر روی ورق CFRP مشاهده شد که مود غالب گسیختگی در همان سیکل‌های ابتدایی در مرز اتصال پوشش محافظ به ورق رخ می‌دهد که نشان دهنده اثرات نامطلوب رطوبت بر چسبندگی این پوشش می‌باشد. در آزمایش "کشش از سطح" مقاومت چسبندگی در ناحیه شکست (گسیختگی) قابل تعیین می‌باشد. به عنوان نمونه اگر سطح شکست در لایه پوشش محافظ رخ داده باشد، مقاومت بدست آمده، مقاومت چسبندگی پوشش محافظ (در ناحیه جدا شده) می‌باشد. بدیهی است در این حالت مقاومت چسبندگی سطوح جدا نشده (ورق CFRP و بتن که دچار گسیختگی نشده است) بیشتر از ناحیه شکست می‌باشد که تعیین مقدار دقیق آن با این روش امکان‌پذیر نیست. مطابق با نتایج جدول ۱۰ از سیکل ۶۰ تا ۳۰۰ تر و خشک شدگی مقاومت چسبندگی پوشش محافظ پایه اپوکسی (در نمونه با پوشش محافظ) کمتر از مقاومت چسبندگی ورق CFRP به بتن (در نمونه بدون پوشش محافظ) می‌باشد. با توجه به اینکه مقاومت بدست آمده از آزمایش "کشش از سطح" وابستگی کامل به محل جداشدگی و سطح شکست دارد، بنابراین در نمونه با پوشش محافظ پایه اپوکسی که محل گسیختگی در لایه پوشش محافظ افتاده است، مقاومت چسبندگی مربوط به همین ناحیه می‌باشد. با توجه به مقاومت چسبندگی بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که شرایط تر و خشک شدگی موجب کاهش قابل ملاحظه مقاومت و دوام این پوشش شده است. از آنجا که شکست در این نمونه‌ها در لایه پوشش محافظ اتفاق افتاده است بنابراین می‌توان گفت شرایط تر و خشک شدگی مقاومت چسبندگی پوشش محافظ پایه اپوکسی را بیش از سطح زیرین آن یعنی ورق CFRP و بتن تحت تاثیر قرار می‌دهد. مجددا تاکید می‌گردد دلیل اینکه در نمونه با این نوع پوشش محافظ مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ کمتر بدست آمده است، به ناحیه شکست مرتبط می‌باشد. به عبارتی اثرات نامطلوب شرایط تر و خشک شدگی در مقاومت پوشش محافظ بیشتر از ورق CFRP و بتن می‌باشد. این در حالی است که با اعمال پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب بر روی ورق CFRP گسیختگی تا سیکل ۶۰م تر و خشک شدگی در بتن بستر رخ می‌دهد و با اعمال سیکل‌های بیشتر به سمت ترکیبی از گسیختگی ناحیه چسب و بتن بستر پیش می‌رود. عدم جداشدگی اتصال بین پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب و ورق CFRP تحت اعمال سیکل‌های تر و خشک شدگی بیانگر چسبندگی مناسب آن به ورق می‌باشد. مطابق با شکل ۱۰ با اعمال این پوشش محافظ کاهش مقاومت چسبندگی در تمامی سیکل‌ها بخصوص در سیکل‌های اولیه در مقایسه با حالت بدون پوشش محافظ کمتر شده است، به عنوان نمونه به ترتیب در سیکل‌های ۳۰ و ۳۰۰ در نمونه بدون پوشش محافظ کاهش مقاومت چسبندگی ۲۹٪ و ۴۰٪ و در نمونه با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب ۲٪ و ۲۷٪ می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت اگرچه دوام و چسبندگی این نوع پوشش محافظ بر اثر اعمال چرخه‌های تر و خشک شدگی کاهش یافته است، اما مقاومت آن در برابر سیکل‌های تر و خشک شدگی در مقایسه با ورق CFRP بیشتر بوده است.

ج) یخ و ذوب یخ

در شکل ۱۳ میانگین مقاومت چسبندگی و در شکل ۱۴ درصد مودهای گسیختگی مشاهده شده تحت اعمال سیکل‌های مختلف یخ و ذوب یخ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در هر سیکل میانگین ۶ تکرار آزمایش کشش از سطح می‌باشد.



شکل ۱۳: میانگین مقاومت چسبندگی تحت شرایط محیطی یخ و ذوب یخ، حاصل از آزمایش "کشش از سطح".



الف) نمونه تقویت شده با ورق CFRP بدون پوشش محافظ (ب) نمونه تقویت شده با CFRP با پوشش محافظ الیافی حاوی ماده هوازا
شکل ۱۴: درصد مدهای گسیختگی مشاهده شده تحت شرایط محیطی یخ و ذوب یخ، حاصل از آزمایش "کشش از سطح".

جدول ۱۱: میانگین مقاومت چسبندگی و مود غالب گسیختگی حاصل از آزمایش کشش از سطح تحت شرایط یخ و ذوب یخ

سیکل	مقاومت چسبندگی (MPa)	مود غالب گسیختگی
نمونه کنترل	۲/۳۲	بتن بستر (مود A)
۳۰	۱/۸۸(۱۸/۹۱) ^۱	سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)
۶۰	۱/۶۶(۲۸/۴۴) ^۱	سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)
۹۰	۱/۴۹(۳۵/۵۸) ^۱	سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)
۱۵۰	۱/۳۴(۴۲/۰۲) ^۱	سطح بالایی بتن و ماتریس (مود A/B)
۳۰۰	۰/۵۶(۷۵/۶۷) ^۱	گسیختگی در محل اتصال ورق CFRP به چسب (مود D)
نمونه کنترل	۲/۳۲	بتن بستر (مود A)
۳۰	۲/۱(۹/۴۱) ^۲	ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)
۶۰	۲/۰۳(۱۲/۵۲) ^۲	ترکیبی از گسیختگی بتن بستر و ناحیه چسب (مود B)
۹۰	۱/۸۸(۱۹/۰۷) ^۲	محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)
۱۵۰	۱/۶۹(۲۷/۲۳) ^۲	محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)
۳۰۰	۱/۰۴(۵۵/۱۸) ^۲	محل اتصال پوشش محافظ به ورق CFRP (مود F)

^۱مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل بدون پوشش محافظ می‌باشد.
^۲مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ ملات الیافی حاوی ماده هوازا می‌باشد.



ج) نمونه با پوشش محافظ ملات الیافی حاوی ماده هوازا، گسیختگی در مرز اتصال پوشش محافظ به CFRP



ب) نمونه بدون پوشش محافظ، گسیختگی در سطح بالایی بتن و ماتریس



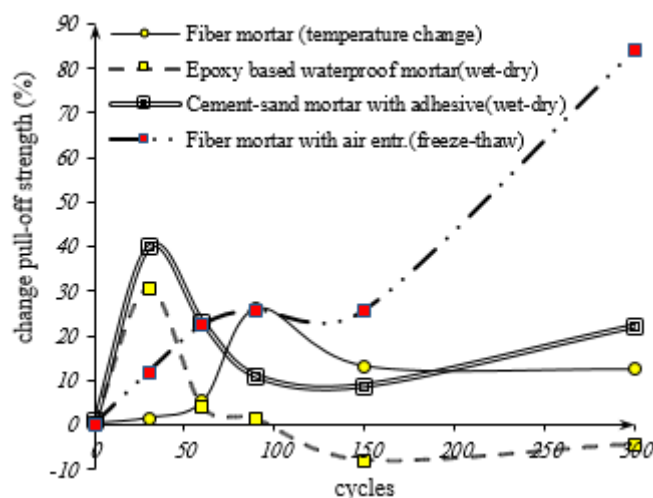
الف) نمونه بدون پوشش محافظ، گسیختگی در محل اتصال ورق CFRP به چسب

شکل ۱۵: مودهای گسیختگی در نمونه تحت شرایط یخ و ذوب یخ حاصل از آزمایش کشش از سطح

مطابق با نتایج بدست آمده، اعمال شرایط یخ و ذوب یخ بر نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP بدون پوشش محافظ در همان سیکل‌های اولیه (۳۰ سیکل اول) موجب ظاهر شدن شکست سطح بالایی بتن و ماتریس می‌گردد. نکته قابل توجه در این نوع شرایط محیطی این است که در سیکل پایانی ۳۰۰ غالباً گسیختگی در محل اتصال ورق CFRP به چسب (مود D) رخ می‌دهد، که مطابق استاندارد ASTM D4541-09 علت این نوع جداشدگی اثرات تخریبی شرایط محیطی می‌باشد. بر خلاف دیگر شرایط محیطی که کاهش مقاومت چسبندگی پس از چند سیکل تا حد زیادی ثابت باقی می‌ماند، تحت شرایط محیطی یخ و ذوب یخ تا سیکل پایانی ۳۰۰ همچنان کاهش مقاومت چسبندگی مشاهده می‌شود. طوری که این کاهش مقاومت در سیکل ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب برابر با ۲۸، ۳۶، ۴۲ و ۷۶ درصد می‌باشد. کاهش پیوسته مقاومت چسبندگی در این شرایط محیطی نشان دهنده اثرات تخریبی شدید سیکل‌های یخ و ذوب یخ نسبت به دو شرایط دیگر محیطی می‌باشد. در سیکل نهایی با ۷۶٪ کاهش مقاومت چسبندگی عملاً عملکرد و کارایی ورق CFRP تا حدود بسیار زیادی از بین رفته است.

اعمال پوشش محافظ ملات الیافی حاوی ماده هوازا موجب به تعویق افتادن خرابی ناشی از این شرایط محیطی شده است. به طوری که تا ۶۰ سیکل اولیه گسیختگی از شکست در سطح بالایی بتن و ماتریس (در نمونه‌های بدون پوشش محافظ) به ترکیبی از گسیختگی ناحیه چسب و بتن بستر تبدیل شده است. در سیکل‌های ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به دلیل یخ زدن و ذوب شدن متوالی عملکرد پوشش محافظ کاهش یافته و جداشدگی در محل اتصال آن به ورق CFRP رخ می‌دهد. کاهش مقاومت چسبندگی نیز در سیکل ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب برابر با ۹، ۱۲، ۱۹، ۲۷ و ۵۵ درصد می‌باشد که در مقایسه با حالت بدون پوشش محافظ کاهش کمتری داشته است. باید توجه داشت که تحت شرایط یخ زدن، آب موجود در حفره‌های سیستم CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی، دچار انبساط می‌شود و به عناصر مجاور تنش وارد می‌کند. در صورتی که تنش به وجود آمده از مقاومت عناصر اطراف تجاوز کند باعث شکست آن‌ها می‌گردد. نتایج حاکی از آن است که با تکرار سیکل‌های یخ زدن و آب شدن، خرابی به صورت تصاعدی افزایش یافته و در نهایت به انهدام کامل منجر می‌شود. از طرفی ذوب یخ باعث افزایش دما می‌گردد و ضمن کاهش از حجم آب یخ زده، موجب افزایش حجم دیگر عناصر موجود در سیستم می‌گردد که این عمل باعث تشدید خرابی حاصل از انبساط دمایی می‌گردد. همچنین وجود آب باعث آسیب دیدگی چسب بکار رفته و نیز بتن بستر می‌شود.

در شکل ۱۶ میانگین تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه‌های دارای پوشش محافظ نسبت به نمونه مشابه بدون پوشش محافظ حاصل از آزمایش کشش از سطح نشان داده شده است.



شکل ۱۶: تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ تحت شرایط محیطی مختلف، حاصل از آزمایش "کشش از سطح"

مطابق با شکل ۱۶ و با توجه به مقادیر مثبت تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ الیافی، می‌توان گفت استفاده از این پوشش محافظ تحت شرایط تغییر دما موجب افزایش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ تا سیکل نهایی ۳۰۰ گردیده است. شیب نزولی و سپس ثابت این نمودار پس از سیکل ۹۰ بیانگر آن است که عملکرد و مقاومت پوشش محافظ تحت تاثیر شرایط تغییر دمایی در سیکل‌های پایانی کاهش یافته است. اما مقاومت چسبندگی همچنان نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ مقادیر بیشتری بدست آمده است. تغییرات مقاومت چسبندگی بدست آمده از آزمایش کشش از سطح در نمونه با پوشش محافظ الیافی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب برابر با ۱، ۵، ۲۶، ۱۳ و ۱۲ درصد می‌باشد.

همان طور که قبلاً اشاره شد، در شرایط تر و خشک شدگی از دو نوع پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی و ملات ماسه سیمان حاوی چسب استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۴ پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی تحت تاثیر شرایط تر و خشک شدگی در ۳۰ سیکل اولیه عملکرد مطلوبی داشته است، بطوریکه استفاده از آن موجب افزایش ۳۱ درصدی مقاومت چسبندگی در سیکل ۳۰ تر و خشک شدگی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ گردید. اما پس از سیکل‌های اولیه عملکرد و مقاومت این پوشش بر اثر اعمال سیکل‌های متوالی تر و خشک شدگی کاهش یافته، بطوریکه در سیکل‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ مقاومت چسبندگی در نمونه با این پوشش محافظ به ترتیب ۸ و ۴ درصد نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ کمتر بدست آمد.

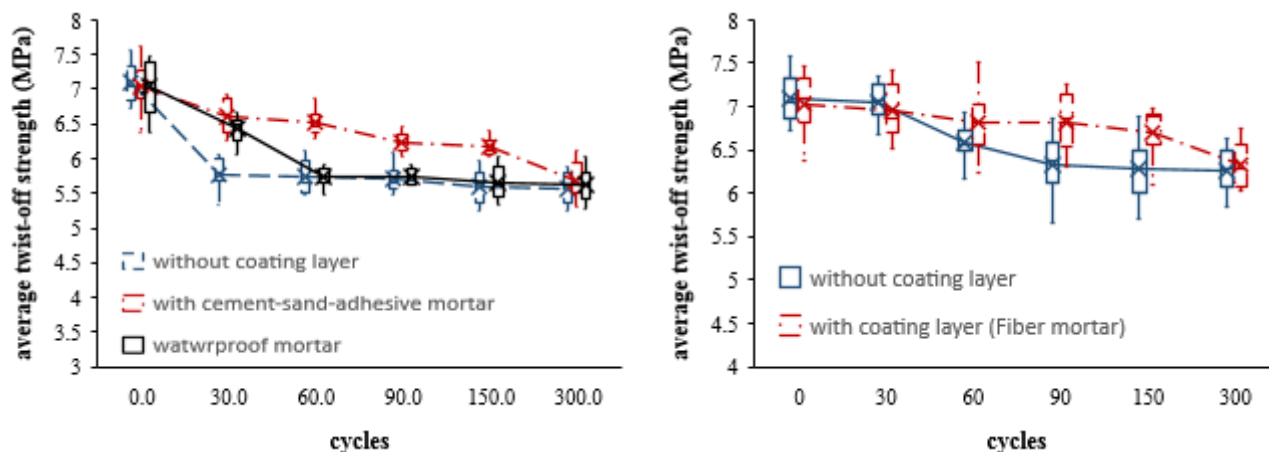
با توجه به نمودار مربوط به پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب در شکل ۱۶ و مقادیر مثبت تغییرات مقاومت چسبندگی، استفاده از این نوع پوشش محافظ موجب بهبود عملکرد و مقاومت نمونه تا سیکل ۳۰۰ تر و خشک شدگی در مقایسه با نمونه بدون پوشش محافظ شده است. مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان حاوی چسب در سیکل ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ به ترتیب ۴۰، ۲۲، ۱۰، ۸ و ۲۲ درصد افزایش یافته است. نتایج حاکی از آن است که، اعمال شرایط یخ و ذوب یخ به شدت موجب کاهش مقاومت چسبندگی نمونه‌های مقاوم شده با ورق CFRP می‌گردد و دوام و عملکرد این ورق‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود اعمال پوشش محافظ ملات الیافی حاوی ماده هوازا بر روی ورق CFRP موجب افزایش مقاومت چسبندگی نمونه در مقایسه با نمونه بدون پوشش محافظ شده است.

مطابق با نتایج بدست آمده در سیکل ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ یخ و ذوب یخ، مقاومت چسبندگی نمونه با این نوع پوشش محافظ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ ۱۱، ۲۲، ۲۵، ۲۵ و ۸۴ درصد افزایش یافته است. افزایش ناگهانی مقاومت چسبندگی در سیکل ۳۰۰ به این علت است که مقاومت چسبندگی نمونه بدون پوشش محافظ در این سیکل بسیار ناچیز و نزدیک به صفر بدست آمد که بیانگر اثر شدید تخریبی شرایط محیطی یخ و ذوب طی ۳۰۰ سیکل بر عملکرد سیستم CFRP می‌باشد. پوشش محافظ ملات الیافی حاوی

ماده هوازا علاوه بر حفظ دوام و عملکرد خود تحت این شرایط محیطی مخرب به نحو مطلوبی توانسته است از ورق CFRP نیز محافظت نماید.

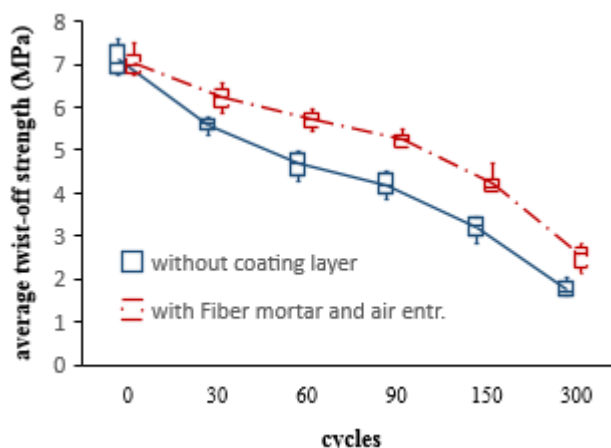
۳-۳- آزمایش پیچش (twist-off)

مقدار لنگر پیچشی لازم برای جدا کردن صفحات فلزی از سطح نمونه‌ها با استفاده از آزمون "پیچش" اندازه‌گیری گردید و با استفاده از رابطه (۲) تنش برشی ناشی از پیچش بدست آورده شد. نتایج میانگین تنش برشی ناشی از پیچش برای نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق CFRP با و بدون پوشش محافظ در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



ب) شرایط محیطی تر و خشک شدگی

الف) شرایط محیطی تغییر دما



ج) شرایط محیطی یخ و ذوب یخ

شکل ۱۷: میانگین مقاومت چسبندگی حاصل از آزمایش "پیچش".

جدول ۱۲: میانگین مقاومت چسبندگی حاصل از آزمایش پیچش تحت شرایط محیطی مختلف

میانگین مقاومت چسبندگی (MPa)			سیکل
بخ و ذوب یخ	تر و خشک شدگی	تغییر دما	
۷/۱	۷/۱	۷/۱	نمونه کنترل
۵/۶(۲۱/۲) ^۱	۵/۷۸(۱۸/۶) ^۱	۷/۰۵(۰/۶) ^۱	۳۰
۴/۶۷(۳۴/۲) ^۱	۵/۷۴(۱۹/۲) ^۱	۶/۵۷(۷/۴) ^۱	۶۰
۴/۲(۴۰/۸) ^۱	۵/۷۱(۱۹/۶) ^۱	۶/۳۳(۱۰/۹) ^۱	۹۰
۳/۲۱(۵۴/۸) ^۱	۵/۶۱(۲۱/۱) ^۱	۶/۲۸(۱۱/۶) ^۱	۱۵۰
۱/۷۸(۷۵) ^۱	۵/۵۸(۲۱/۴) ^۱	۶/۲۷(۱۱/۸) ^۱	۳۰۰
پوشش الیافی با هوازا	پوشش آسبند پایه پوشش ماسه سیمان با چسب	پوشش آسبند پایه اپوکسی	پوشش الیافی
۷/۰۷	۷/۰۶	۷/۱۱	نمونه کنترل
۶/۳۲(۱۲/۱) ^۵	۶/۶۲(۶) ^۴	۶/۴۲(۹/۷) ^۳	۳۰
۵/۷۱(۱۹/۳) ^۵	۶/۵۲(۷/۴) ^۴	۵/۷۴(۱۹/۳) ^۳	۶۰
۵/۲۴(۲۵/۸) ^۵	۶/۲۳(۱۱/۵) ^۴	۵/۷۵(۱۹/۲) ^۳	۹۰
۴/۲۱(۴۰/۵) ^۵	۶/۱۷(۱۲/۴) ^۴	۵/۶۵(۲۰/۶) ^۳	۱۵۰
۲/۵۲(۶۴/۳) ^۵	۶/۱۶(۱۲/۸) ^۴	۵/۶۲(۲۰/۹) ^۳	۳۰۰

^۱مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل بدون پوشش محافظ می‌باشد.

^۲مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ الیافی می‌باشد.

^۳مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ آسبند پایه اپوکسی می‌باشد.

^۴مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ ماسه سیمان حاوی چسب می‌باشد.

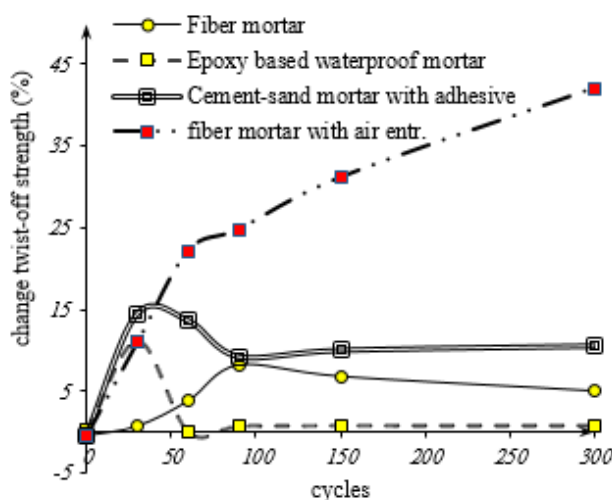
^۵مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه کنترل با پوشش محافظ الیافی حاوی ماده هوازا می‌باشد.

همان طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP با و بدون پوشش محافظ حاصل از آزمایش "پیچش" تا حدود زیادی مشابه آزمون "کشش از سطح" می‌باشد. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۱۷ و جدول ۱۲ میانگین کاهش مقاومت چسبندگی بدست آمده از روش پیچش در نمونه بدون پوشش محافظ پس از اعمال ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ سیکل تغییر دما به ترتیب برابر ۱، ۷، ۱۱، ۱۱ و ۱۱ درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که کاهش مقاومت بدست آمده در ۹۰ سیکل اول صورت گرفته و در ادامه متوقف شده است. شاید بتوان دلیل این امر را به تعادل رسیدن میزان کاهش مقاومت سیستم و دردهای شکست در بتن و مرز بین بتن و لایه CFRP دانست. با اعمال پوشش محافظ الیافی در این نمونه‌ها مقاومت چسبندگی کاهش کمتری داشته است، به طوری که کاهش مقاومت چسبندگی در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب ۱، ۳، ۳، ۵ و ۱۰ درصد می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که سیکل‌های تغییرات دمایی تاثیر نامطلوب چندانی بر مقاومت و عملکرد ورق‌های CFRP ندارد. و همچنین پوشش محافظ حاوی الیاف به صورت موثر مقاومت چسبندگی سیستم را تا سیکل ۱۵۰م افزایش می‌دهد.

در آزمایش نمونه‌ها تحت اعمال سیکل‌های تر و خشک شدگی نباید تاثیر انبساط نامتجانس حاصل از جذب رطوبت و جمع شدگی حاصل از خشک شدگی، بر عوامل موجود در چنین سیستم‌هایی را نادیده گرفت. لذا به نظر می‌رسد، تنش‌های حاصل از ناسازگاری انبساط و انقباض بوجود آمده در لایه‌های CFRP، چسب اعمالی و بتن بستر به قدرت تخریبی نفوذ و جذب آب در هنگام تر شدن سیستم افزوده باشد. البته رسیدن به یک ثبات نسبی در مقاومت چسبندگی پس از اعمال ۳۰ سیکل تر و خشک شدگی اولیه، می‌تواند به تاثیر اندک این نوع انقباض و انبساط دلالت نماید. مطابق با شکل ۱۷ و جدول ۱۲ در نمونه بدون پوشش محافظ پس از اعمال ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ سیکل تر و خشک شدگی مقاومت چسبندگی به میزان ۱۹، ۱۹، ۱۹، ۲۱ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که با اعمال پوشش آسبند پایه اپوکسی کاهش مقاومت چسبندگی تحت سیکل‌های اشاره شده به ترتیب ۸، ۱۸، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ درصد و با اعمال پوشش ملات ماسه سیمان حاوی چسب به ترتیب ۶، ۷، ۱۱، ۱۲ و ۱۹ درصد می‌باشد. مطابق با نتایج بدست آمده، استفاده از این نوع پوشش

محافظ موجب کاهش کمتر مقاومت چسبندگی تحت اعمال سیکل‌های تر و خشک شدگی شده است. مقاومت چسبندگی در نمونه با این پوشش بخصوص در سیکل‌های ابتدایی تر و خشک شدگی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ افزایش قابل توجهی داشته است. نتایج حاکی از آن است که تحت سیکل‌های یخ و ذوب یخ مقاومت چسبندگی لایه‌های CFRP به بتن بستر کاهش زیادی داشته است و تا سیکل‌های نهایی نیز ادامه دارد (شکل ۱۷ ج). این موضوع بیانگر اثر تخریبی بسیار شدید شرایط یخ و ذوب یخ بر ورق‌های CFRP می‌باشد. مطابق نتایج بدست آمده در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ شرایط یخ و ذوب یخ مقاومت چسبندگی به میزان ۲۱، ۳۴، ۴۰، ۵۴ و ۷۵ درصد کاهش یافته است. با اعمال پوشش محافظ الیافی حاوی ماده هواز با بر روی ورق CFRP، میزان کاهش مقاومت چسبندگی کمتر شده اما همچنان این کاهش مقاومت تا سیکل‌های نهایی ادامه دارد. بطوریکه در نمونه‌های با این نوع پوشش محافظ تحت سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب ۱۱، ۱۸، ۲۵، ۴۰ و ۶۴ درصد کاهش مقاومت چسبندگی مشاهده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت وجود مقدار مناسب ماده هواز در شرایط یخ و ذوب یخ ضمن حفاظت از ورق CFRP، دوام و عملکرد سیستم را نیز بخصوص تا سیکل‌های میانی افزایش می‌دهد.

در شکل ۱۸ میانگین تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه‌های دارای پوشش محافظ نسبت به نمونه مشابه بدون پوشش محافظ حاصل از آزمایش پیچش نشان داده شده است.



شکل ۱۸: تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ حاصل از آزمایش پیچش

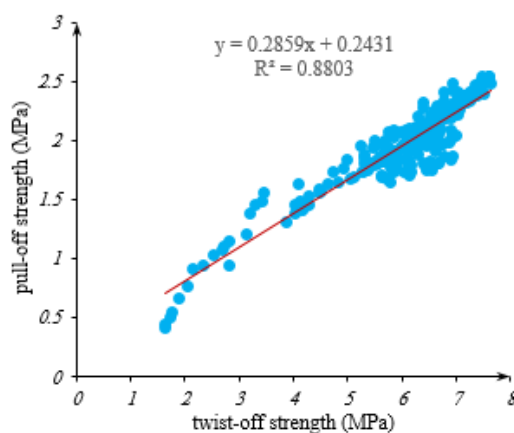
همان طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ الیافی، آبنند پایه اپوکسی، ماسه سیمان با چسب و الیافی با ماده هواز حاصل از آزمایش "پیچش" تا حد زیادی مشابه آزمایش "کشش از سطح" می‌باشد. در تمامی نمونه‌ها اعمال پوشش محافظ بر روی ورق CFRP موجب شده است مقاومت چسبندگی تا سیکل مشخصی از شرایط محیطی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ افزایش یابد و پس از آن نمودار با شیب نزولی یا تقریباً ثابت ادامه داشته است. با توجه به نمودار مربوط به پوشش محافظ الیافی در شکل ۱۸ و مقادیر مثبت تغییرات مقاومت چسبندگی، استفاده از این پوشش محافظ همواره موجب افزایش مقاومت چسبندگی در تمامی سیکل‌های تغییر دما نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ شده است. حداکثر افزایش مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ الیافی نسبت به نمونه بدون این پوشش محافظ در سیکل ۹۰ مشاهده شده است. همانطور که در شکل ۱۸ ملاحظه می‌شود، پس از سیکل ۹۰ شیب نمودار نزولی و سپس تقریباً ثابت می‌شود که بیانگر تاثیر بیشتر سیکل‌های بالاتر تغییرات دمایی بر عملکرد پوشش محافظ الیافی می‌باشد. مطابق با نتایج بدست آمده مقاومت چسبندگی نمونه با این نوع پوشش محافظ در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ تغییرات دمایی به ترتیب ۱/۶، ۴، ۸، ۷ و ۵ درصد بیشتر از نمونه بدون این پوشش محافظ می‌باشد.

نتایج مربوط به تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش‌های محافظ آبند پایه اپوکسی و ملات ماسه سیمان با چسب نیز تا حدود زیادی مشابه آزمون کشش از سطح می‌باشد. در نمونه با پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی حداکثر افزایش مقاومت چسبندگی در سیکل ۳۰م تر و خشک شدگی رخ داده است و پس از آن با کاهش عملکرد و مقاومت پوشش محافظ در این نمونه‌ها عملاً به مقاومت چسبندگی نمونه بدون پوشش محافظ رسیده است. به طوریکه در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ تر و خشک شدگی تغییرات مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ آبند پایه اپوکسی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ به ترتیب ۱۱، ۰، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۸ می‌باشد.

مطابق با نتایج شکل ۱۸ در نمونه با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان با چسب تحت شرایط تر و خشک شدگی همواره افزایش مقاومت چسبندگی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ مشاهده می‌گردد. بیشترین افزایش مقاومت در سیکل ۳۰م تر و خشک شدگی بوده و پس از آن با کاهش اندک به مقدار تقریباً ثابتی رسیده است. نتایج حاکی از آن است که در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ ملات ماسه سیمان با چسب نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ ۱۴، ۱۳، ۹، ۱۰ و ۱۰ درصد افزایش یافته است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، با توجه به آثار تخریبی شدید شرایط محیطی یخ و ذوب یخ بر عملکرد ورق CFRP اعمال پوشش محافظ ملات الیافی حاوی ماده هوازا تا حد زیادی توانسته است عملکرد و مقاومت این ورق‌ها را تحت این شرایط محیطی مخرب افزایش دهد. مطابق با نتایج بدست آمده در سیکل ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ یخ و ذوب یخ، مقاومت چسبندگی نمونه با این نوع پوشش محافظ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ ۱۱، ۲۲، ۲۵، ۳۱ و ۴۲ درصد افزایش یافته است.

۳-۴ - روابط بین نتایج مقاومت چسبندگی کششی و برشی

نتایج مقاومت چسبندگی کششی بدست آمده از آزمایش "کشش از سطح" و مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمایش "پیچش" در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده رابطه مستقیمی بین مقاومت چسبندگی کششی و برشی وجود دارد. ضریب همبستگی در تقریب این رابطه با استفاده از تابع خطی برابر 0.8803 بدست آمده است.



شکل ۱۹: رابطه بین مقاومت چسبندگی کششی و برشی

غالباً مقاومت چسبندگی برشی بیش از مقاومت چسبندگی کششی می‌باشد [۳۲]. در این بررسی‌ها نیز مقاومت چسبندگی برشی حاصل از روش "پیچش" بیشتر از مقاومت چسبندگی کششی حاصل از روش "کشش از سطح" بدست آمده است. تفاوت دیگر نتایج بدست آمده از روش پیچش با روش کشش از سطح در این است که تغییرات مقاومت چسبندگی در این آزمون مقادیر کمتری بدست آمده است. به عنوان نمونه تغییرات مقاومت چسبندگی در نمونه با پوشش محافظ الیافی در سیکل‌های ۳۰، ۶۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ تغییر دما، در آزمون "پیچش" ۰/۶، ۴، ۸، ۷ و ۵ درصد و در آزمون "کشش از سطح" به ترتیب برابر با ۱، ۵، ۲۶ و ۱۲ درصد بدست آمده است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌های متعددی به منظور ارزیابی مقاومت چسبندگی ورق CFRP تقویت کننده بتن و پوشش‌های محافظ اعمال شده بر این ورق‌ها در شرایط محیطی حاد پرداخته شد. آزمایشات انجام شده در این تحقیق شامل آزمایش "کشش از سطح" و "پیچش" برای تعیین مقاومت چسبندگی نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ و آزمایش مقاومت فشاری ملات (پوشش‌های محافظ) می‌باشد. پیش از انجام این آزمایشات، نمونه‌های ساخته شده تحت سیکل‌های مختلف تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ قرار داده شدند. در این قسمت به خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده اشاره شده است.

۱- مقاومت چسبندگی نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP بدون پوشش محافظ تحت اعمال سیکل‌های تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ، کاهش معنی داری می‌یابد. این کاهش مقاومت تحت سیکل‌های تغییر دما کمترین و تحت سیکل‌های یخ و ذوب یخ بیشترین مقدار را داشته است. به عنوان نمونه در سیکل ۱۵۰ام تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ کاهش مقاومت چسبندگی آزمایش "کشش از سطح" به ترتیب برابر ۲۴، ۴۰ و ۷۵ درصد و آزمایش "پیچش" به ترتیب ۱۱، ۲۱ و ۷۴ درصد می‌باشد. به بیان دیگر شرایط محیطی تغییر دما کمترین و یخ و ذوب یخ بیشترین اثر منفی را بر مقاومت چسبندگی ورق CFRP دارد.

۲- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کشش از سطح، شکست سطح بالایی بتن و ناحیه اتصال به FRP که ناشی از تاثیرات مخرب شرایط محیطی بر چسبندگی ورق CFRP می‌باشد، تحت شرایط تغییرات دما از سیکل ۹۰، شرایط تر و خشک شدگی از سیکل ۶۰ و تحت شرایط یخ و ذوب یخ از سیکل ۳۰ مشاهده می‌گردد. بنابراین شرایط یخ و ذوب یخ و تر و خشک شدگی با سرعت بیشتری چسبندگی CFRP به بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۳- استفاده از پوشش محافظ الیافی همواره موجب افزایش مقاومت چسبندگی در تمامی سیکل‌های تغییر دما نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ شده است. حداکثر افزایش مقاومت چسبندگی نمونه با پوشش محافظ الیافی نسبت به نمونه بدون این پوشش محافظ در سیکل ۹۰ مشاهده شده است. پس از سیکل ۹۰ شیب نمودار نزولی و سپس تقریباً ثابت می‌شود که بیانگر تاثیر بیشتر سیکل‌های بالاتر تغییرات دمایی بر عملکرد پوشش محافظ الیافی می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که مقاومت فشاری این پوشش پس از ۳۰۰ سیکل تغییرات دما به میزان ۱۴٪ کاهش می‌یابد.

۴- پوشش محافظ آبنند پایه اپوکسی تحت تاثیر شرایط تر و خشک شدگی در ۳۰ سیکل اولیه عملکرد مطلوبی داشته است، اما پس از سیکل‌های اولیه عملکرد و مقاومت این پوشش بر اثر اعمال سیکل‌های متوالی تر و خشک شدگی کاهش یافته، بطوریکه در سیکل‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ مقاومت چسبندگی نمونه با این پوشش محافظ حتی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ نیز کمتر است، که علت اصلی آن در ارتباط کامل با محل گسیختگی (شکست) و ناحیه جداشدگی می‌باشد. با توجه به اینکه ناحیه شکست در سیکل‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ تر و خشک شدگی در نمونه با پوشش محافظ در لایه پوشش محافظ و در نمونه بدون پوشش محافظ در ناحیه اتصال بتن و ماتریس چسب اتفاق افتاده است، بنابراین می‌توان گفت شرایط تر و خشک شدگی مقاومت چسبندگی پوشش محافظ آبنند پایه اپوکسی را بیش از ورق CFRP و بتن تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارتی اثرات نامطلوب شرایط تر و خشک شدگی بر مقاومت چسبندگی لایه پوشش محافظ بیشتر از ورق CFRP و بتن می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری پوشش آبنند پایه اپوکسی پس از ۳۰۰ سیکل تر و خشک شدگی به طور قابل ملاحظه‌ای (۵۳٪) کاهش یافته است. با توجه به اینکه استفاده از پوشش محافظ ماسه سیمان با چسب موجب بهبود عملکرد و مقاومت نمونه تا سیکل نهایی تر و خشک شدگی شده است، از این رو پوشش ماسه سیمان با چسب در شرایط تر و خشک شدگی مناسب‌تر از ملات آبنند پایه اپوکسی می‌باشد.

۵- نتایج حاکی از آن است که، اعمال پوشش محافظ الیافی حاوی ماده هوازا بر روی ورق CFRP موجب افزایش مقاومت چسبندگی نمونه در مقایسه با نمونه بدون پوشش محافظ شده است. افزایش ناگهانی مقاومت چسبندگی در سیکل ۳۰۰ به این علت است که مقاومت چسبندگی نمونه بدون پوشش محافظ در این سیکل بسیار ناچیز و نزدیک به صفر بدست آمد که بیانگر اثر شدید تخریبی شرایط محیطی یخ و ذوب یخ طی ۳۰۰ سیکل بر عملکرد سیستم CFRP می‌باشد. همچنین تغییرات مقاومت فشاری در این پوشش محافظ پس از ۳۰۰ سیکل یخ و ذوب یخ، ۸٪ بوده است. مطابق با نتایج بدست آمده، پوشش محافظ الیافی حاوی ماده هوازا علاوه بر حفظ دوام و عملکرد خود تحت این شرایط محیطی مخرب به نحو مطلوبی توانسته است از ورق CFRP نیز محافظت نماید.

۶- نتایج حاصل از آزمون "کشش از سطح" و "پیچش" روند مشابه‌ای داشته است. تفاوت اصلی نتایج این دو آزمون در این است که تغییرات مقاومت چسبندگی از روش "پیچش" مقادیر کمتری بدست آمده است.

مراجع

- [1] Fazli, H., & Teo, W. (2016, December). FRP shear contribution in externally bonded reinforced concrete beams with stirrups. In *Engineering Challenges for Sustainable Future: Proceedings of the 3rd International Conference on Civil, Offshore and Environmental Engineering (ICCOEE 2016, Malaysia, 15-17 Aug 2016)* (p. 63). CRC Press.
- [2] Karbhari, V. M., & Zhao, L. (1997). Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening. *Composite structures*, 40(3-4), 293-304.
- [3] American Concrete Institute. Committee 440. (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: ACI 440.2 R-08. American Concrete Institute.
- [4] Belarbi, A., & Bae, S. W. (2007). An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 674-684.
- [5] Gharachorlou, A., & Akbar Ramezani-pour, A. (2010). Resistance of concrete specimens strengthened with FRP sheets to the penetration of chloride ions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1), 141.
- [6] Böer, P., Holliday, L., & Kang, T. H. K. (2013). Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: a review. *Construction and Building Materials*, 48, 360-370.
- [7] Gopalan, R., Somashekar, B. R., & Dattaguru, B. (1989). Environmental effects on fibre—Polymer composites. *Polymer degradation and stability*, 24(4), 361-371.
- [8] Gentry, T. R., Bank, L. C., Barkatt, A., & Prian, L. (1998). Accelerated test methods to determine the long-term behavior of composite highway structures subject to environmental loading. *Journal of Composites, Technology and Research*, 20(1), 38-50.
- [9] Silva, M. A., da Fonseca, B. S., & Biscaia, H. (2014). On estimates of durability of FRP based on accelerated tests. *Composite Structures*, 116, 377-387.
- [10] Cusson, R., & Xi, Y. (2002). *The behavior of fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates* (No. CDOT-DTD-R-2003-4). University of Colorado.
- [11] Pan, Y., Xian, G., & Li, H. (2018). Effects of freeze-thaw cycles on the behaviour of the bond between CFRP plates and concrete substrates. *Journal of Composites for Construction*, 22(3), 04018011.
- [12] Yun, Y., & Wu, Y. F. (2011). Durability of CFRP—concrete joints under freeze—thaw cycling. *Cold Regions Science and Technology*, 65(3), 401-412.
- [13] Heshmati, M., Haghani, R., & Al-Emrani, M. (2017). Durability of CFRP/steel joints under cyclic wet-dry and freeze-thaw conditions. *Composites Part B: Engineering*, 126, 211-226.
- [14] Shi, J. W., Zhu, H., Wu, G., & Wu, Z. S. (2014). Tensile behaviour of FRP and hybrid FRP sheets in freeze—thaw cycling environments. *Composites Part B: Engineering*, 60, 239-247.
- [15] Ferrier, E., Rabinovitch, O., & Michel, L. (2016). Mechanical behaviour of concrete—resin/adhesive—FRP structural assemblies under low and high temperatures. *Construction and Building Materials*, 127, 1017-1028.
- [16] Liu, S., Pan, Y., Li, H., & Xian, G. (2019). Durability of the bond between CFRP and concrete exposed to thermal cycles. *Materials*, 12(3), 515.
- [17] Shrestha, J., Zhang, D., & Ueda, T. (2016). Durability performances of carbon fiber—reinforced polymer and concrete-bonded systems under moisture conditions. *Journal of composites for construction*, 20(5), 04016023.
- [18] Raoof, S. M., & Bournas, D. A. (2017). Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 127, 150-165.
- [19] ASTM, A. (2015). D7522. D7522M, "Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete Substrate.
- [20] Cleland, D. J., & Long, A. E. (1997). The pull-off test for concrete patch repairs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-structures and Buildings*, 122(4), 451-460.
- [21] Standard, A. S. T. M. (2009). Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings using Portable Adhesion Testers (ASTM D4541). *ASTM International: West Conshohocken, PA*.
- [22] Naderi, M. (2007). New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6), 602-608.
- [23] ASTM, A. (2013). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standards Annual Book of ASTM Standards*, 4(1), 1-9.
- [24] ASTM, C. (2008). 33, 2008 "Standard Specification for Concrete Aggregates". *West Conshohocken, USA*.

- [25] Pliya, P., Beaucour, A. L., & Noumowé, A. (2011). Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1926-1934.
- [26] Han, C. G., Hwang, Y. S., Yang, S. H., & Gowripalan, N. (2005). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and concrete research*, 35(9), 1747-1753.
- [27] Zhang, P., Li, D., Qiao, Y., Zhang, S., Sun, C., & Zhao, T. (2018). Effect of air entrainment on the mechanical properties, chloride migration, and microstructure of ordinary concrete and fly ash concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018265.
- [28] Pigeon, M., Pleau, R., Azzabi, M., & Banthia, N. (1996). Durability of microfiber-reinforced mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(4), 601-609.
- [29] Niu, D., Jiang, L., Bai, M., & Miao, Y. (2013). Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition. *Materials & Design*, 44, 267-273.
- [30] Standard, A. S. T. M. C666, 2007, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, DOI: 10.1520/C0666-07.
- [31] Xiang, S., Zeng, L., Zhang, J., Chen, J., Liu, Y., Cheng, G., & Mo, J. (2019). A DIC-Based Study on Compressive Responses of Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *Materials*, 12(13), 2044.
- [32] Chendes, R., Dan, S., & Courard, L. (2013). Comparison of shear and pull-off tests for testing adhesion of different content limestone fillers mortars used as repair system. *Construction sustainability: efficient solution for design, execution and rehabilitation of the build*.