

## The Effects of Substrate and Epoxy Temperature on the Bond Strength of GFRP Laminates using Pull-Off and Twist-Off Tests\*

Research Article

Peyman Imani Jajarmi<sup>1</sup>  
Mohammadreza Tavakkolizadeh<sup>2</sup>  
Abbas Youssefi<sup>3</sup>

### 1. Introduction

In recent years Fiber Reinforced Polymers (FRPs) increasingly used as an efficient way to repair and retrofit concrete structures. Performance of FRP systems depends on environmental, chemical and mechanical conditions. This study investigated the effects of substrate and epoxy temperature at the time of installation (5 to 80°C) on bond strength between GFRP and cement-based mortar substrate, using pull-off test (POT) and twist-off test (TOT). A total of 288 tests were conducted and the results showed that the specimen with 50°C substrate and epoxy temperature had the highest bond strength. Comparing to the control specimen, the bond strength of this specimens increased up to 36 and 24% for POT and TOT, respectively. Additionally, the reduction of the substrate surface temperature caused a decrease in bond strength. Furthermore, by increasing the substrate temperature beyond  $T_g$ , a significant loss in POT and TOT strength was observed. It was noted that the negative effect of low substrate temperature can be reduced by increasing epoxy temperature. A logarithmic correlation between POT and TOT bond test was observed. The results of the analysis of variance revealed that substrate surface temperature and epoxy temperature significantly affect the adhesion of the two materials and bond strength.

### 1. Introduction

Using FRP sheets has several beneficial effects on strengthening, retrofitting, and rehabilitation of structural elements. In the past few decades, FRP sheets have been widely used for strengthening of RC beams because of their superior mechanical, physical and chemical properties. In retrofitted reinforced concrete members, adhesive joints transfer stress through two distinct mechanisms: 1) chemical bonding, and 2) mechanical interlock. The former is a result of chemical interactions between the adhesive and concrete substrate, while the latter is due to the porosity of concrete and roughness of substrate surface.

Various factors affect the bond adhesion between FRP systems and concrete substrate, which can be referred to as environmental, physical, and chemical factors. The surface substrate and epoxy temperature at the time of installation are two factors affecting the performance of FRP systems.

According to American Concrete Institute Committee 440 Guidelines, the maximum service temperature of an FRP strengthening system should be limited to glass transition temperature,  $T_g$ , of the resin used. The  $T_g$  is the temperature at which epoxy transition from a rigid state to a viscoelastic state. Above the  $T_g$  value, properties of

epoxy can be dramatically reduced and changes in molecular mobility, rigidity, volume, percent elongation to break may occur. A more conservative limit on maximum design temperature is recommended by American Association of State Highway and Transportation Officials, where the maximum design temperature is about 20°C below the  $T_g$  of most epoxies. International federation for structural concrete (*fib*) recommends that  $T_g$  of the adhesive used should be sufficiently large with respect to the service temperature and not less than 45°C.

Myers et al., used POT, TOT, and flexural tests to evaluate the effects of environmental conditions during installation of CFRP reinforcement. Test results revealed that maximum allowable surface moisture content and relative humidity were 4.3% and 82%, respectively. Moreover, they noted that FRP laminates could be installed within a temperature range of 4 to 50°C. The effects of temperature and moisture on the bond strength between FRP laminates and cement-based mortar substrates were investigated by Imani et al. as well. They demonstrated a significant reduction in bond strength when the temperature exceeds the  $T_g$  of adhesives.

In this study, the effects of surface substrate and epoxy temperature during installation on the bond quality GFRP systems were investigated. Experiments were carried out using the POT and TOT. The data obtained were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA). New accurate relations were proposed using nonlinear regression techniques on data obtained from POT and TOT for estimating bond strength of GFRP systems with different conditions.

### 2. Method

In this study, 32 specimens with the dimensions of 300×300×60 mm<sup>3</sup> strengthened by GFRP sheets were prepared and evaluated under POT and TOT as shown in Figure 1.

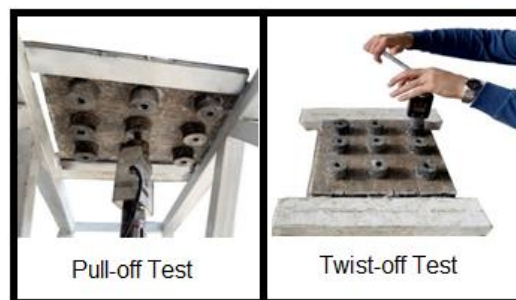


Figure 1. Test set up for POT and TOT

The bond strengths of GFRP systems were investigated for two conditions before FRP installation, namely:

- I. Different temperatures of the cement-based mortar surface;
- II. Different temperatures of the epoxy.

GFRP laminates were installed on specimens under laboratory conditions of 25°C as control specimens. Mortar specimens for condition I (after complete curing)

\* Manuscript received: January, 5, 2022 Revised, February, 7, 2022, Accepted, February, 27, 2022.

<sup>1</sup> PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Email: drt@um.ac.ir

<sup>3</sup> Director, Par-e-Tavous Research Institute, Mashhad, Iran.

were kept in a temperature control chamber (cooler or heater) for at least 5 days before the installation of GFRP laminates. The prescribed temperature conditions for these specimens were chosen as 5°C, 50°C, and 80°C. The two higher temperatures of 50°C and 80°C were chosen to investigate the effect of temperatures near and above *T<sub>g</sub>*. Moreover, the epoxy resin for condition II was reached to same temperatures before installation. Nine POTs and TOTs were conducted for each condition and the results were averaged and reported with the observed failure modes.

**2.1. Bond Strength**

Bond strength measured using two different test setups and the gathered data were analyzed to determine effectiveness of GFRP laminate and cement-based mortar system.

**2.1.1. POT strength**

Table 1 shows the results of POT for different conditions. As results show, the POT strength for control specimen was 0.84 MPa. Installation at 5°C temperature resulted in 13% reduction in average bond strength. On the contrary, an increase in the epoxy temperature leads to an increase in the average bond strength between GFRP and mortar substrate. However, upon increasing the surface temperature beyond 50°C, a significant loss in POT strength was observed due to thermal degradation and oxidative cross-linking. For specimens with low surface temperature, increasing epoxy temperature led to the increase in bond strengths.

**Table 1. The summary of the POT strength**

Test Group	$\bar{f}_p$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	<i>C<sub>v</sub></i> (%)
5-5	0.70	8.02	0.13
5-25	0.73	26.84	0.21
5-50	0.78	23.56	0.18
5-80	0.71	13.58	0.10
25-5	0.75	11.78	0.09
25-25 (Control)	0.84	21.89	0.18
25-50	0.91	9.07	0.08
25-80	0.72	18.26	0.13
50-5	1.07	10.26	0.11
50-25	1.12	10.93	0.12
50-50	1.14	12.46	0.14
50-80	0.81	17.41	0.13
80-5	0.82	11.40	0.09
80-25	0.78	34.15	0.27
80-50	0.81	14.73	0.12
80-80	0.68	19.34	0.13

**2.1.2. TOT strength**

Table 2 shows the results of TOT. As can be seen, the reduction of TOT adhesion for GFRP samples installed on surfaces with a temperature of 5°C, after using epoxy with temperatures of 5, 25, 50 and 80°C was 12, 13, 3, and 15%, respectively. Generally, for specimens with low surface temperature, increasing epoxy temperature before installation led to improvement in performance of GFRP systems. At surface temperatures of 25°C and 50°C, increasing the epoxy temperature to 50°C increased the TOT adhesion strength. On the other hand, installing GFRP at 80°C, due to the decrease of adhesive properties, reduced bond strength. In this case, depending on the temperature of the epoxy at the time of installation, the TOT strength decreased between 3 to 20%, compared to the laboratory environment.

**Table 2. The summary of the TOT strength**

Test Group	$\bar{f}_p$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	<i>C<sub>v</sub></i> (%)
5-5	3.48	27.63	0.96
5-25	3.44	13.43	0.46
5-50	3.85	13.14	0.5
5-80	3.39	12.64	0.43
25-5	3.77	7.54	0.28
25-25 (Control)	3.96	12.94	0.51
25-50	4.36	15.58	0.68
25-80	3.70	10.58	0.39
50-5	4.86	10.74	0.52
50-25	4.76	9.57	0.46
50-50	4.92	9.38	0.43
50-80	3.74	10.75	0.40
80-5	3.83	9.92	0.38
80-25	3.64	8.14	0.30
80-50	3.68	12.17	0.45
80-80	3.16	10.75	0.34

**2.2. Failure modes**

Three predominant failure modes were observed during bond tests:

- cohesive failure in mortar substrate (G);
- adhesive failure at the interface between GFRP laminates and mortar substrate (E);
- mixed-mode failure including mortar failure and interface failure (F).

For the specimens prepared at temperature 25 and 50°C, the failure mode G was observed. With increasing substrate surface temperature beyond *T<sub>g</sub>*, the percentage of failure modes F and E increased.

**2.3. Statistical analysis**

In order to better understand the impact of various factors (independent variables) and their interactions on the responses (dependent variables), observed data for bond strength were analyzed using SPSS (using the ANOVA). This analysis was done for differences at 0.05 significance level. Table 3 shows the results of the ANOVA for POT and TOT strength. As it can be seen, in Table 4, substrate surface, epoxy temperate and their interactions affect TOT and TOT strength.

**Table 3. ANOVA results for POT and TOT strength**

Factors	Sums of Squares		<i>df</i>	Mean Square		<i>P</i> -Values	
	POT	TOT		POT	TOT	POT	TO
Surface Temp.	1.652	22.04	3	0.55	7.35	0.00	0.00
Epoxy Temp.	0.784	10.43	3	0.26	3.48	0.00	0.00
Interaction	101.83	2266.78	16	6.37	141.7	0.00	0.00

**3. Conclusion**

Mechanical bond strength tests were conducted on cement-based mortar substrate and GFRP laminate installed using wet layup techniques to assess the effects of substrate surface and epoxy temperature during the installation process on the quality and performance of the bond. Test results revealed that the high surface and epoxy temperature cause a substantial decrease in the adhesive bond strength between GFRP and cementitious mortar substrate. The POT and TOT strength reduced by 13% when substrate surface temperature was 5°C. In this case, with increase of epoxy temperature up to 50°C, the POT and TOT can be increased. The analysis of variance showed that surface and epoxy temperature had great influence on POT and TOT strength.

## بررسی اثر دمای بستر و اپوکسی در هنگام نصب بر روی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP با استفاده از دو آزمون جدا کردن با کشش (Pull-off) و با پیچش (Twist-off)\*

مقاله پژوهشی

پیمان ایمانی جاجرمی<sup>(۱)</sup> محمدرضا توکلی‌زاده<sup>(۲)</sup> عباس یوسفی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** استفاده از ورق‌های پلیمر مسلح با الیاف (FRP) به دلیل مزایای بسیار زیاد آن‌ها به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح به‌سازی سازه‌های بتنی شناخته شده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر دمای سطح بستر و هم‌چنین اپوکسی در بازه ۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بر روی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP با الیاف شیشه‌ای به بستر پایه سیمانی است. به همین منظور، از دو آزمون نیمه‌مخرب جدا کردن تحت کشش (Pull-off Test: POT) و جدا کردن تحت پیچش (Twist-off Test: TOT) بهره گرفته شده است. نتیجه‌های این پژوهش براساس تحلیل و بررسی داده‌های ۲۸ آزمون از ۳۲ نمونه ساخته شده گزارش شده است. به‌منظور درک بهتر اثر دمای سطح بستر و چسب اپوکسی و هم‌چنین برهم‌کنش آن‌ها، بر روی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل واریانس نیز (ANOVA) قرار گرفت. براساس این پژوهش، بیشترین مقاومت چسبندگی مربوط به نمونه‌هایی با دمای سطحی و اپوکسی ۵۰ درجه سانتی‌گراد بود که نسبت به نمونه مبنای (دمای سطحی و اپوکسی ۲۵ درجه سانتی‌گراد)، برای روش POT و TOT به‌ترتیب، ۳۶ و ۲۴ درصد افزایش را نشان داد. هم‌چنین، نتیجه‌ها نشان داد، اثر منفی دمای سطح بستر را می‌توان تا حدی با افزایش دمای اپوکسی جبران کرد. افزون بر این، تحلیل درون‌یابی غیرخطی انجام‌شده بر روی نتیجه‌ها حاکی از وجود یک رابطه‌ی نمایی بین مقاومت‌های چسبندگی به‌دست‌آمده از دو روش POT و TOT بود.

**واژه‌های کلیدی** مقاومت چسبندگی، دمای سطح بستر، دمای اپوکسی، آزمون جدا کردن با کشش (Test Pull-off)، و آزمون کشش با پیچش (Test Twist-off)، ورق GFRP.

### مقدمه

[3,4]. چسبندگی شیمیایی، نتیجه واکنش‌های شیمیایی بین چسب، الیاف و سطح بتن است [5,6]، درحالی‌که قفل شونده مکانیکی، حاصل نفوذ چسب به درون منافذ سطح بتن و توانایی ترکندگی سطح بستر توسط چسب است [7]. به‌طور کلی از سه نوع مصالح FRP برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه استفاده می‌شود که شامل ورق‌های با الیاف کربن (CFRP)، الیاف شیشه (GFRP) و الیاف آرامید (AFRP) می‌باشد [8]. ورق‌های GFRP به‌دلیل در دسترس بودن و هزینه پایین تولید در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه در محیط‌های خشک کاربرد بسیار زیادی دارند. برای نمونه، چوته و آگراوال [9] نشان دادند، ورق‌های GFRP ظرفیت باربری را بین ۲۲ تا ۴۳ درصد افزایش می‌دهند. رفتار ستون‌های بتنی تقویت شده با ورق‌های GFRP توسط ژانگ و همکاران [10] نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بسیار مطلوبی گزارش شد.

ترمیم و به‌سازی سازه‌های بتنی از دیرباز به‌عنوان یکی از چالش‌های مهندسان عمران شناخته شده است. از این رو روش‌های مختلفی از جمله استفاده از غلاف‌های بتن‌آرمه یا فولادی و پیش‌تیدگی به‌منظور بهبود رفتار سازه‌ها ارائه شده است. چسباندن ورق‌های پلیمر مسلح با الیاف (FRP) به سطح کششی بتن و یا استفاده از آن به‌عنوان دورپیچ ستون‌ها یکی از روش‌های نوین و پرکاربرد در مقاوم‌سازی اعضای بتن‌آرمه است. از مهم‌ترین عواملی که در تقویت سازه‌های بتن‌آرمه تقویت‌شده با ورق‌های FRP باید بدان توجه کرد، بحث مقاومت چسبندگی و جلوگیری از جداشدگی زود هنگام ورق از بستر است [1,2].

در کاربردهایی که از چسب به‌عنوان وسیله‌ای برای ایجاد پیوستگی بین ورق و بستر استفاده می‌شود، تنش‌ها از طریق دو سازوکار مختلف به لایه تقویت‌کننده منتقل می‌شوند. این دو سازوکار عبارتند از چسبندگی شیمیایی و قفل شونده مکانیکی

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) مدیر عامل مؤسسه تحقیقاتی پرتاوس، شرکت لعاب مشهد.

نتیجه‌ها نشان داد که اثر دو عامل دما و رطوبت سطحی بر روی میزان مقاومت چسبندگی بیشتر از مقاومت فشاری بستر است. مایرز و همکاران [21] به منظور بررسی اثر شرایط محیطی بر روی مقاومت چسبندگی ورق‌های CFRP از آزمایش‌های جدا کردن با کشش (Pull-off)، جدا کردن با پیچش (Twist-off) و خمش (Flexural) استفاده کردند. نتیجه‌ها نشان داد که ورق‌های FRP را می‌توان در بازه دمایی ۴ تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد بدون نگرانی نصب کرد. اثر دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد روی مقاومت چسبندگی FRP نیز مورد بررسی قرار گرفته است [22,23]. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعه جامعی در زمینه بررسی اثر دمای سطح بستر بتن و اپوکسی در هنگام نصب انجام نشده است.

باتوجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط فصلی گوناگون پروژه‌های مقام‌سازی، عملکرد سامانه‌های FRP می‌تواند تحت تأثیر زیادی قرار گیرد. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر دمای سطح بستر و اپوکسی بر روی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP نصب‌شده بر روی بسترهای پایه‌سیمانی بوده است. به همین منظور، ۱۴۴ آزمون جدا کردن با کشش (Pull-off Test: ) و ۱۴۴ آزمون جدا کردن با پیچش (Twist-off Test: ) و ۳۲ بر روی بستر پایه‌سیمانی انجام شد. به منظور بررسی اثر دمای سطح بستر و چسب اپوکسی بر روی مقاومت چسبندگی، بستر و اپوکسی پیش از عملیات نصب ورق‌های GFRP در چهار دمای مختلف ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

## برنامه آزمایشگاهی

### مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱ می‌باشد که نمودار دانه‌بندی ذرات (PSD) آن و ترکیبات شیمیایی آن به ترتیب، در شکل (۱) و جدول (۱) آمده است.

ماسه‌ای که در این پژوهش برای ساخت بستر پایه‌سیمانی استفاده شد، ماسه رودخانه‌ای با اندازه بزرگ‌ترین دانه ۴/۷۵ میلی‌متر بود که نمودار دانه‌بندی آن در شکل (۲) آورده شده است.

در این پژوهش، ۳۲ نمونه بستر پایه‌سیمانی به ابعاد ۶۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر مکعب براساس طرح اختلاط جدول (۲) ساخته شد. مقاومت فشاری، ضریب کشسانی، روانی (میز جریان)

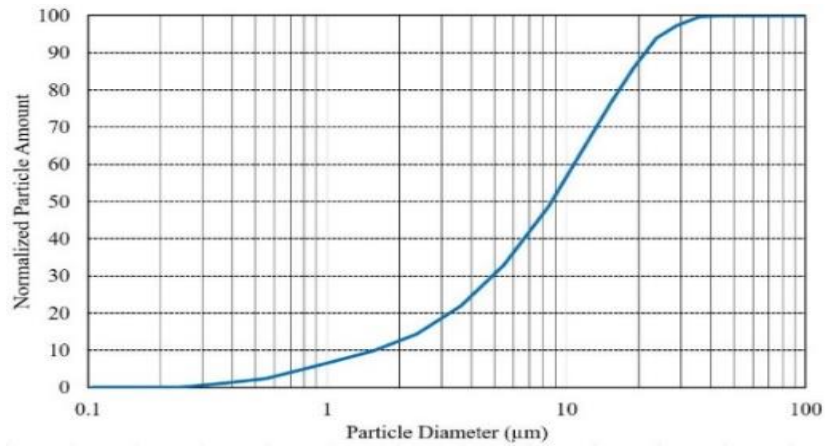
عوامل گوناگونی در مقاومت چسبندگی و هم‌چنین پیوستگی سطح تماس بین بستر بتنی و الیاف تأثیرگذار می‌باشد که می‌توان به عوامل محیطی، فیزیکی و شیمیایی اشاره کرد. در این میان، دمای سطح بتن و اپوکسی در زمان عملیات نصب از عوامل بسیار مؤثر در چسبندگی ورق‌های FRP به‌شمار می‌آید. براساس پیشنهاد کمیته ۴۴۰ مؤسسه بتن آمریکا [11]، بیشینه دما در زمان کاربرد مصالح FRP به دمای انتقال شیشه‌ای اپوکسی ( $T_g$ ) محدود می‌شود. یادآور می‌شود،  $T_g$  دمایی است که در آن دما اپوکسی از حالت صلب به حالت انعطاف‌پذیر و خمیری تغییر حالت می‌دهد. شایان ذکر است، محدودیت‌های محافظه‌کارانه‌تری در مورد حداکثر دمای بهره‌برداری در کاربردهای مصالح FRP توسط انجمن بزرگراه‌های ایالتی و مدیران حمل‌ونقل آمریکا [12] در نظر گرفته شده است. طبق بررسی‌های انجام گرفته‌شده توسط انجمن بتن اروپا [13]،  $T_g$  اپوکسی مصرفی در ساخت FRP نباید کمتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد باشد. از سویی دیگر آیلو و همکاران [14] توصیه کردند که  $T_g$  اپوکسی مورد استفاده، باید ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از بیشینه دمای بهره‌برداری باشد.

خاطر نشان می‌سازد، در دماهای بالاتر از  $T_g$ ، ویژگی‌های مکانیکی اپوکسی مانند مقاومت و سختی به شدت کاهش می‌یابد. با افزایش دما و گذر از  $T_g$ ، ناگهان انرژی جنبشی مولکول‌های اپوکسی افزایش می‌یابد و روند خطی بودن تغییرات انرژی جنبشی بر حسب افزایش دما بر هم می‌خورد و با شیب بیشتری پیش می‌رود. با افزایش جنبش مولکول‌ها، نیروی جاذبه بین مولکولی کاهش می‌یابد و اپوکسی شکننده‌تر می‌شود [15].

بررسی‌های نووین و همکاران [16] نشان داد که با افزایش دما به بیشتر از  $T_g$ ، ظرفیت باربری به شدت کاهش پیدا می‌کند. لئون و همکاران [17] از آزمون کشش دو طرفه (Double-Lap Shear) به منظور تعیین اثر دماهای بالا بر روی چسبندگی FRP استفاده کردند. نتیجه‌های پژوهش آن‌ها، کاهش تنش قابل تحمل سامانه را در دماهای بالاتر از  $T_g$  را نشان داد. آن‌ها بیشترین مقاومت چسبندگی را در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. نتیجه‌های آن‌ها هم‌خوان با یافته‌های بلونتروک و همکاران [18] و عطاری و توکلی‌زاده [19] بود. اثر مقاومت فشاری، دما و رطوبت سطحی بستر بر روی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP توسط ایمانی جاجرمی و همکاران [20] مورد بررسی قرار گرفت.

پژوهش به‌کار گرفته شده‌است و همچنین، دمای  $T_g$  اپوکسی براساس گزارش شرکت سازنده، ۴۵ درجه سانتی‌گراد بود.

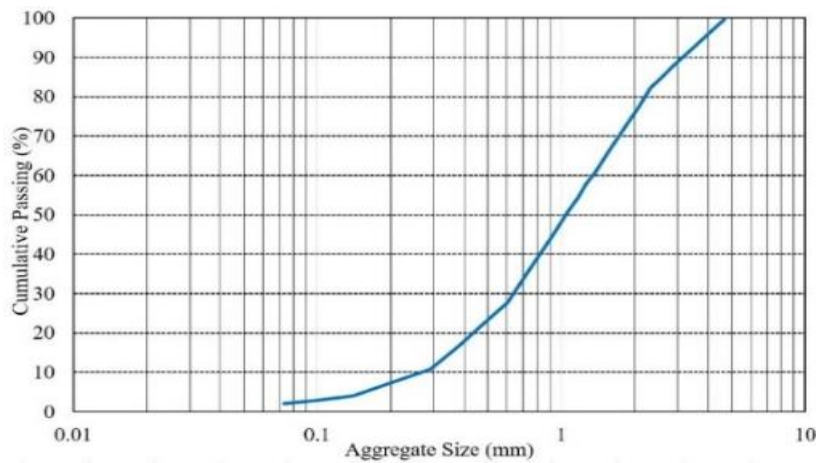
و تخلخل این نمونه‌ها در جدول (۳) آورده شده‌است. ویژگی‌های الیاف و اپوکسی مصرفی در جدول (۴) نشان داده شده‌است. خاطرنشان می‌سازد، پارچه الیافی شیشه‌ای تک‌سویه در این



شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ذرات سیمان مصرفی

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تپ یک مصرفی

نوع اکسید	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Other
میزان (%)	۲۰/۹	۴/۵	۳/۸	۶۳/۵	۲/۷	۲/۰	۰/۵	۰/۴۵	۱/۶۵



شکل ۲ نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی

جدول ۲ طرح اختلاط بستر پایه‌سیمانی تهیه‌شده

نسبت آب به سیمان (W/C)	نسبت ماسه به سیمان (S/C)	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )
۰/۵۵	۲/۷۵	۵۵۹/۰۰	۱۵۳۷/۲۵	۳۰۷/۴۵

جدول ۳ ویژگی‌های مکانیکی بستر پایه‌سیمانی تهیه‌شده

مقاومت فشاری (MPa)			ضریب کشسانی (MPa)	روانی (%)
۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۳۳۱	۱۰۸
۲۰/۸۱	۲۳/۰۷	۳۳/۷۵		

جدول ۴ ویژگی‌های مکانیکی پارچه الیافی و اپوکسی مصرفی

مصلح	مقاومت کششی (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)	افزایش طول (%)
الیاف شیشه	۲۲۰۰/۰۰	۷۰/۰۰	۳/۰۰
اپوکسی	۵۵/۰۰	۲/۵۰	۲/۶۰

### شرایط دمایی

مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP در دو حالت مختلف دمایی زیر مورد بررسی قرار گرفت:

۱. دماهای گوناگون سطح بستر در هنگام نصب.

۲. دماهای گوناگون اپوکسی در هنگام نصب.

خاطر نشان می‌سازد، نمونه‌ای که در آن، هر دو دمای سطح بستر و اپوکسی در هنگام نصب ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود، به‌عنوان نمونه مبنا تهیه و نام‌گذاری شد. برای شرایط دمایی حالت (۱)، نخست، نمونه‌ها قبل از نصب ورق GFRP به مدت ۵ روز درون سردخانه یا گرم‌خانه قرار گرفتند تا به دمای سطحی مورد نظر و به تعادل برسند. یادآور می‌شود، دماهای مورد بررسی ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد بود. برای حالت (۲)، اجزای اپوکسی (رزین و سخت‌کننده) قبل از مصرف و اعمال بر روی سطح بستر پایه‌سیمانی به مدت ۲۰ دقیقه در دمای مورد نظر قرار می‌گرفت. در این حالت، مطابق شرایط دمایی (۱)، دماهای مورد بررسی ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد بود. شایان ذکر است، دمای ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌منظور بررسی اثر دماهای نزدیک و بالاتر از  $T_g$  اپوکسی در نظر گرفته شد.

### آزمون جدا کردن با کشش (POT)

POT، نخستین بار، در دانشگاه کووین و به‌منظور تعیین مقاومت سطحی بتن انجام شد [24]. با گسترش کاربرد مصالح FRP و نیاز به آگاهی یافتن از کارایی این روش‌ها، کاربرد آن به‌منظور بررسی

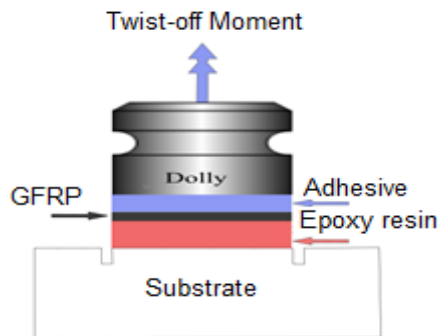
و ارزیابی مقاومت چسبندگی سیستم‌های FRP پیشنهاد شد [25]. لازم به ذکر است، از POT به‌منظور ارزیابی گونه ۱ شکست بهره‌جویی می‌شود. در این روش یک پولک فولادی یا آلومینیومی با استفاده از یک چسب مناسب و با مقاومت بالا به سطح بتن و یا FRP چسبانده می‌شود و سپس نیروی کششی به‌آرامی و تا زمان گسیختگی اعمال می‌شود [26,27]. این روش به‌عنوان یک آزمون نیمه‌مخرب شناخته می‌شود، به‌طوری‌که پس از انجام آزمایش، سطح مورد نظر به‌راحتی قابل تعمیر است. شایان ذکر است، این روش متأثر از عوامل مختلفی است که می‌توان به مشخصات مغزه‌گیری، ابعاد و جنس پولک و شرایط بارگذاری اشاره کرد [28]. براساس دستورالعمل‌های موجود، عمق مغزه باید بین ۶ تا ۱۲ میلی‌متر باشد [29] که در این پژوهش شیارهایی به عمق ۶ میلی‌متر ایجاد شد. هم‌چنین، از پولک‌های فولادی با قطر ۴۵ میلی‌متر استفاده شد. مقاومت چسبندگی POT با استفاده از رابطه (۱) به‌دست می‌آید [27].

$$f_p = \frac{4F_p}{\pi D^2} \quad (1)$$

در این رابطه،  $f_p$ ،  $F_p$  و  $D$  به‌ترتیب، مقاومت POT، حداکثر نیروی کششی ثبت شده و قطر پولک است. شکل (۳) طرح‌واره‌ای از چیدمان POT و نحوه اجرای آن را نشان می‌دهد.



شده است. شکل (۵) محل نصب پولک‌های مورد استفاده در دو آزمون POT و TOT را بر روی سطح ورق GFRP نصب شده روی بستر پایه سیمانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نتیجه‌های مقاومت چسبندگی POT و TOT براساس میانگین ۹ آزمون ارائه می‌شود. این در حالی است که طبق استاندارد ASTM D4541 [25]، سه آزمون برای یافتن میانگین مقاومت چسبندگی POT کفایت می‌کند.



(الف)



(ب)

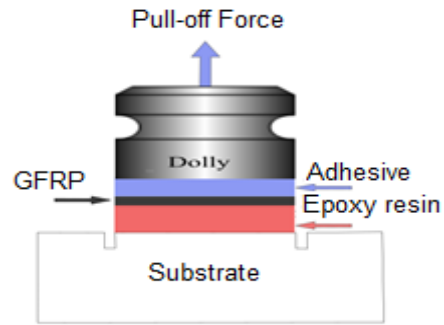
شکل ۴ چیدمان آزمایش TOT: الف) طرح‌واره و ب) نحوه اجرای آزمون



(ب)

(الف)

شکل ۵ محل نصب پولک‌های مورد استفاده در آزمون‌ها: الف) POT و ب) TOT



(الف)



(ب)

شکل ۳ چیدمان آزمایش POT: الف) طرح‌واره و ب) نحوه اجرای آزمون

### آزمون جدا کردن با پیچش (TOT)

یکی دیگر از آزمون‌هایی که برای بررسی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP پیشنهاد شده است، TOT است که قادر به ارزیابی گونه ۲- شکست است [30]. روش انجام این آزمون مشابه POT است با این تفاوت که به جای اعمال نیروی کششی عمود بر سطح از گشتاور پیچشی در سطح برای ارزیابی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP استفاده می‌شود. جذابیت این روش در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزئی و هزینه اندک انجام آن است که آن را در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی مقاومت چسبندگی می‌تواند متمایز سازد. باید دانست، مشابه POT، این آزمون را می‌توان بر روی سطوح افقی و قائم انجام داد. مانند POT، عمق شیار و قطر پولک فولادی به ترتیب ۶ و ۴۵ میلی‌متر انتخاب شد. مقاومت TOT با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید [30].

$$f_t = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (2)$$

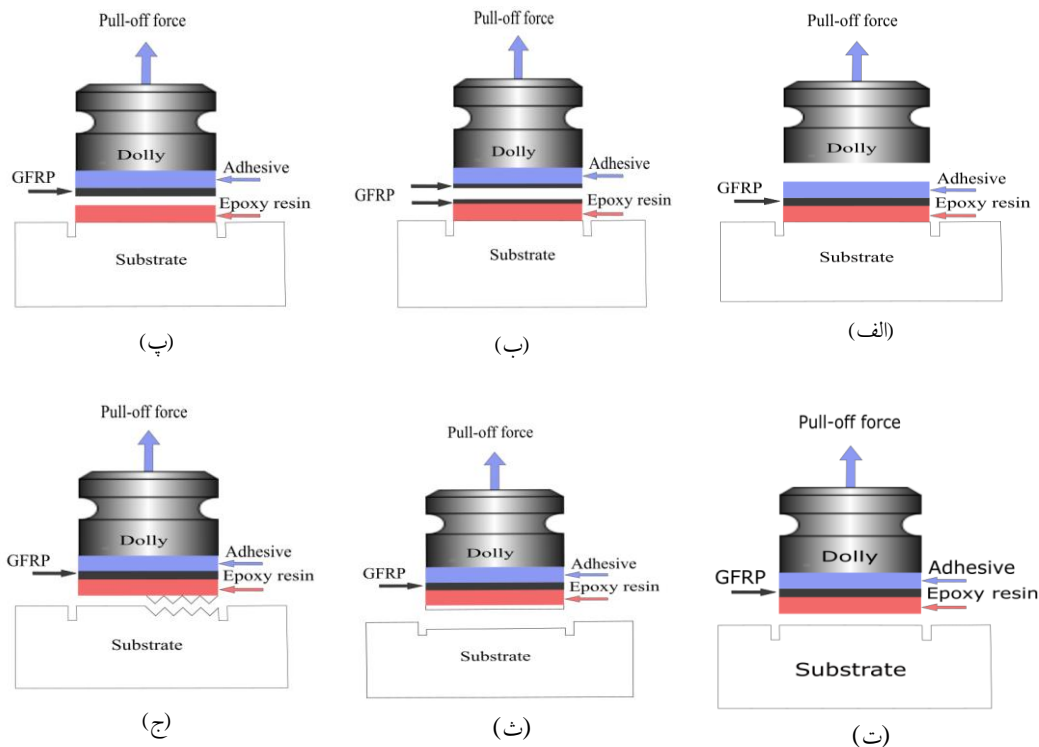
در این رابطه،  $f_t$ ،  $T$  و  $D$  به ترتیب، مقاومت TOT، حداکثر گشتاور پیچشی ثبت شده در طول آزمون و قطر پولک است. در شکل (۴) نمایی از TOT به همراه نحوه اجرای این آزمون آورده

### گونه‌های گسیختگی

طبق استاندارد ASTM D7522 [23]، در آزمون POT، احتمال رخداد ۶ شکل گونه گسیختگی وجود دارد که در شکل (۶) آمده است.

شکست نوع A، که در سطح تماس بین پولک و FRP رخ می‌دهد، بیانگر استفاده از چسب نامناسب برای اتصال پولک به سطح بستر است. لازم به ذکر است، مقاومت به دست آمده در این گونه شکست قابل قبول نیست و آزمون باید دوباره و در نقطه‌ای دیگر تکرار شود. شکست نوع B، نشانگر شکست بین لایه‌ای FRP است. این شکست می‌تواند ناشی از کیفیت پایین فرآیند تولید ورق FRP باشد. شکست در سطح تماس اپوکسی و ورق FRP نوع دیگر شکست می‌باشد و با حرف C نشان داده شده است. نوع دیگر گونه شکست که در سطح تماس بین اپوکسی و بستر پایه‌سیمانی رخ می‌دهد و به شکست سطح تماس اشاره دارد با حرف E نشان داده می‌شود. این نوع شکست

می‌تواند ناشی از انتخاب نامناسب چسب، ترکیب ناقص چسب و عمل‌آوری نامناسب آن و همچنین کاستی‌های اجرایی باشد. پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که وجود رطوبت در سطح تماس بین اپوکسی و بستر پایه‌سیمانی و همچنین تغییرات دمایی از عوامل ایجاد چنین گونه شکستی می‌باشد [31,32]. شکست پیوستگی بستر پایه‌سیمانی، گونه G، مطلوب‌ترین نوع گونه شکست است و در این حالت می‌توان ادعا کرد که FRP نقش مقاومت و به‌سازی خود را به‌خوبی انجام خواهد داد. شکست نوع G، بیانگر این موضوع است که مقاومت چسبندگی FRP از مقاومت بستر بیشتر است و بستر سیمانی ضعیف‌ترین عضو این سامانه است. شکست نوع F، معرف حالت شکست ترکیبی است که در آن بخشی از بستر پایه‌سیمانی و بخشی از چسب سطح تماس فلوه‌کن می‌شود. به عبارت دیگر، این نوع شکست تلفیقی از گونه‌های شکست E و G است. به نظر می‌رسد که گونه‌های شکست مشابهی را می‌توان برای TOT در نظر گرفت.



شکل ۶ انواع گونه‌های گسیختگی براساس ASTM-D7522-15 [۲۰]: الف) شکست نوع A، ب) شکست نوع B، پ) شکست نوع C، ت) شکست نوع E، ث) شکست نوع G، ج) شکست نوع F



## تجزیه و تحلیل آماری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل (دمای سطح بستر و چسب اپوکسی) بر متغیرهای وابسته (مقاومت چسبندگی POT و TOT) از تحلیل آماری استفاده شد. به همین منظور، آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. تحلیل واریانس از آن دسته روش های آماری است که می تواند اختلاف بین گروه ها یا دسته ها را بررسی کند. اساس این روش، تفکیک پراکندگی داده ها به چند بخش است. در این آزمون فرضیات زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

۱. فرض صفر ( $H_0$ ): میانگین متغیر در گروه های آماری برابر است.
  ۲. فرض مقابل صفر ( $H_1$ ): حداقل دو گروه آماری وجود دارد که میانگین آن ها با یکدیگر برابر نیست.
- لازم به ذکر است، چنانچه سطح معناداری این آزمون از مقدار خطای ۵ درصد کمتر باشد، فرض صفر رد و در غیر این صورت فرض صفر تأیید می گردد.

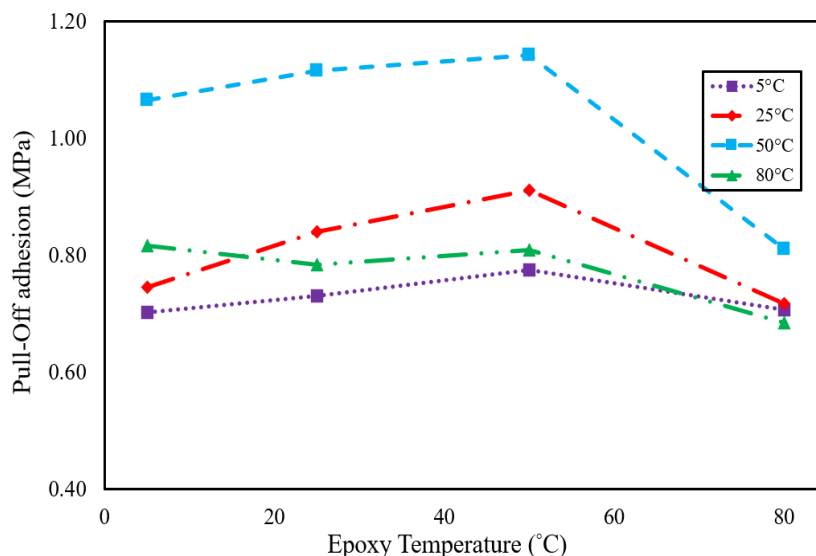
## نتیجه ها

### مقاومت چسبندگی POT

نتیجه های POT در جدول (۵) آمده است. یادآور می شود، نتیجه ها براساس میانگین ۹ نمونه گزارش شده است. در این جدول، مقادیر میانگین مقاومت چسبندگی POT، انحراف معیار و ضریب تغییرات به ترتیب، با  $\bar{f}_p$ ،  $\sigma$  و Cv نشان داده شده است. اسامی نمونه ها با دو حرف X-Y نشان داده شده است که در آن X بیانگر دمای سطح بستر و Y بیانگر دمای اپوکسی در هنگام نصب می باشد. به عنوان مثال نمونه ای که دارای دمای سطح ۵ و دمای اپوکسی ۵۰ درجه سانتی گراد است، با نماد ۵-۵۰ نشان داده شده است. براساس نتیجه های نشان داده شده در جدول (۵)، مقاومت چسبندگی نمونه مینا (نمونه ۲۵-۲۵) ۰/۸۴ مگاپاسکال است. نتیجه ها نشان می دهد که با کاهش دمای سطحی بستر از ۲۵ درجه سانتی گراد، مقاومت چسبندگی کاهش می یابد. با این وجود، افزایش دمای اپوکسی تا حدی می تواند میزان این افت مقاومت را کاهش دهد. برای نمونه ۲۵-۵ افت ۱۳ درصدی مقاومت POT دیده می شود. این در حالی است که با افزایش دمای اپوکسی به ۵۰ درجه سانتی گراد (۵-۵۰)، مقاومت

جدول ۵ نتیجه های POT

گروه	$\bar{f}_p$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	Cv (%)
۵-۵	۰/۷۰	۸/۰۲	۰/۱۳
۵-۲۵	۰/۷۳	۲۶/۸۴	۰/۲۱
۵-۵۰	۰/۷۸	۲۳/۵۶	۰/۱۸
۵-۸۰	۰/۷۱	۱۳/۵۸	۰/۱۰
۲۵-۵	۰/۷۵	۱۱/۷۸	۰/۰۹
۲۵-۲۵ (مینا)	۰/۸۴	۲۱/۸۹	۰/۱۸
۲۵-۵۰	۰/۹۱	۹/۰۷	۰/۰۸
۲۵-۸۰	۰/۷۲	۱۸/۲۶	۰/۱۳
۵۰-۵	۱/۰۷	۱۰/۲۶	۰/۱۱
۵۰-۲۵	۱/۱۲	۱۰/۹۳	۰/۱۲
۵۰-۵۰	۱/۱۴	۱۲/۴۶	۰/۱۴
۵۰-۸۰	۰/۸۱	۱۷/۴۱	۰/۱۳
۸۰-۵	۰/۸۲	۱۱/۴۰	۰/۰۹
۸۰-۲۵	۰/۷۸	۳۴/۱۵	۰/۲۷
۸۰-۵۰	۰/۸۱	۱۴/۷۳	۰/۱۲
۸۰-۸۰	۰/۶۸	۱۹/۳۴	۰/۱۳



شکل ۷ نمودار تغییرات میانگین مقادیر چسبندگی POT برای بسترهایی با دمای مختلف در برابر تغییرات دمای اپوکسی

جدول ۶ درصد تغییرات مقاومت چسبندگی POT گروه‌های مختلف نسبت به نمونه مبنا (۲۵-۲۵) (دمای اپوکسی - دمای بستر)

نمونه	۵-۵	۵-۲۵	۵-۵۰	۵-۸۰	۲۵-۵	۲۵-۲۵	۲۵-۵۰	۲۵-۸۰
درصد اختلاف مقاومت	-۱۶/۴۱	-۱۳/۰۵	-۷/۷۰	-۱۵/۸۹	-۱۱/۲۷	-	۸/۴۲	-۱۴/۶۹
نمونه	۵۰-۵	۵۰-۲۵	۵۰-۵۰	۵۰-۸۰	۸۰-۵	۸۰-۲۵	۸۰-۵۰	۸۰-۸۰
درصد اختلاف مقاومت	۲۶/۷۹	۳۲/۹۳	۳۵/۹۸	-۲/۵۶	-۲/۸۵	-۶/۶۹	-۳/۷۴	-۱۸/۵۰

کاهش مقاومت TOT برای نمونه‌های GFRP نصب شده بر روی سطوح با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، پس از استفاده از اپوکسی با دماهای ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب، برابر ۱۲، ۱۳، ۳ و ۱۵ درصد است. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد، برای بسترهایی با دمای پایین‌تر از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمایی محیطی پایین‌تر از محیط استاندارد آزمایشگاهی)، با پیش گرمایش اپوکسی می‌توان تا حدی اثر منفی دمای سطح بستر را جبران کرد. در صورتی که حرارت اعمالی به اپوکسی، بیشتر از میزان  $T_g$  آن باشد، به دلیل ایجاد اثرات منفی بر روی اپوکسی مانند کاهش ظرفیت باربری و سختی، مقاومت چسبندگی کاهش خواهد یافت. همچنین، جدول (۷) نشان می‌دهد که در دمای سطحی ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش دمای اپوکسی تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش میزان چسبندگی می‌شود. از سوی دیگر، نصب GFRP در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش مقاومت و عملکرد آن می‌شود. در این حالت، بسته به دمای

شکل (۷) تغییرات مقاومت POT را با در نظر گرفتن دمای اپوکسی نشان می‌دهد. در این شکل، هر منحنی مربوط به یک دمای سطح بستر مشخص است و محور افقی و قائم به ترتیب، نشان‌دهنده دمای اپوکسی در زمان نصب GFRP و مقاومت چسبندگی POT بر حسب مگاپاسکال است.

در جدول (۶)، تغییرات مقاومت POT نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه مبنا را می‌توان مشاهده کرد. بیشترین افزایش و کاهش میزان مقاومت چسبندگی، برابر با ۳۵/۹۸ و ۱۸/۵۱ درصد می‌باشد که به ترتیب، مربوط به نمونه‌های ۵۰-۵۰ و ۸۰-۸۰ است.

### مقاومت چسبندگی TOT

نتیجه‌های TOT در جدول (۷) و شکل (۸) آمده است. مشابه نتیجه‌های POT، این مقادیر براساس میانگین ۹ آزمایش TOT گزارش شده است. همان‌گونه که در جدول (۷) قابل مشاهده است،

موضوع، هم‌خوان با نتیجه‌های گزارش شده پیشین است [34]. البته باید توجه داشت که جنس و توزیع تنش اعمالی به سطح تماس در دو روش با هم متفاوت است.

شایان ذکر است، مدل‌های ریاضی برای دو روش POT و TOT و براساس نتیجه‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش ارائه شده‌است. در این روابط، دمای سطح بستر و هم‌چنین دمای چسب اپوکسی در هنگام استفاده به‌عنوان متغیرهای مستقل و مقادیر POT و TOT به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده‌است. برپایه تحلیل‌های درونیابی، رابطه‌های (۳) و (۴)، به‌ترتیب، روابط پیشنهادی برای پیش‌بینی مقادیر مقاومت POT و TOT با در نظر گرفتن دمای سطح بستر و اپوکسی است.

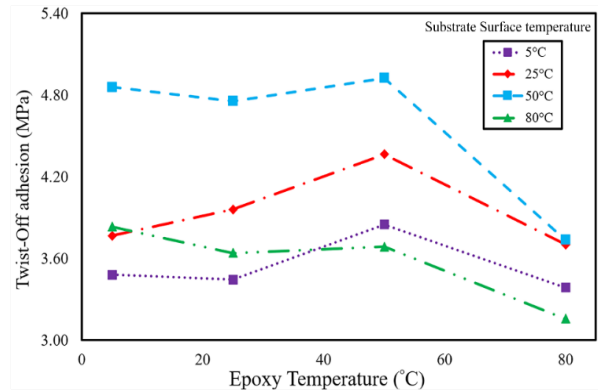
$$f_p = 0.74T_s^{0.6}T_E^{-0.026} \quad (3)$$

$$f_t = 3.72T_s^{0.038}T_E^{-0.023} \quad (4)$$

لازم به ذکر است، در رابطه‌های بالا  $T_E$  و  $T_s$ ، به‌ترتیب، نشان‌دهنده دمای بستر و اپوکسی در هنگام نصب می‌باشد. به‌منظور ارزیابی میزان خطای روابط پیشنهادی و مقادیر آزمایشگاهی از چهار روش مختلف میانگین مربع خطاها (RSME)، میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای مطلق تجمعی (IAE) و ضریب تعیین (R-Squared) استفاده شد. مقادیر RSME، MAE، IAE و R-Squared به‌ترتیب، برای POT، برای TOT، به‌ترتیب، ۰/۳۸۲، ۰/۰۲۱، ۰/۱۳۱ و ۰/۹۸۵ می‌باشد درحالی‌که این مقادیر برای TOT، به‌ترتیب، ۰/۳۴۶، ۰/۰۱۵، ۰/۱۰۴ و ۰/۹۷۴ به‌دست آمد. هم‌چنین نتیجه انجام درونیابی غیرخطی بین داده‌های این دو آزمایش نشان از وجود یک رابطه‌نمایی بین آن‌ها دارد که در شکل (۱۰) آورده شده‌است.

اپوکسی در زمان استفاده، مقاومت TOT بین ۳ تا ۲۰ درصد نسبت به شرایط محیطی آزمایشگاه کاهش می‌یابد.

شکل (۸)، تغییرات مقاومت TOT را با در نظر گرفتن دمای اپوکسی نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده دمای اپوکسی و محور عمودی نشان‌دهنده میزان مقاومت چسبندگی TOT است.



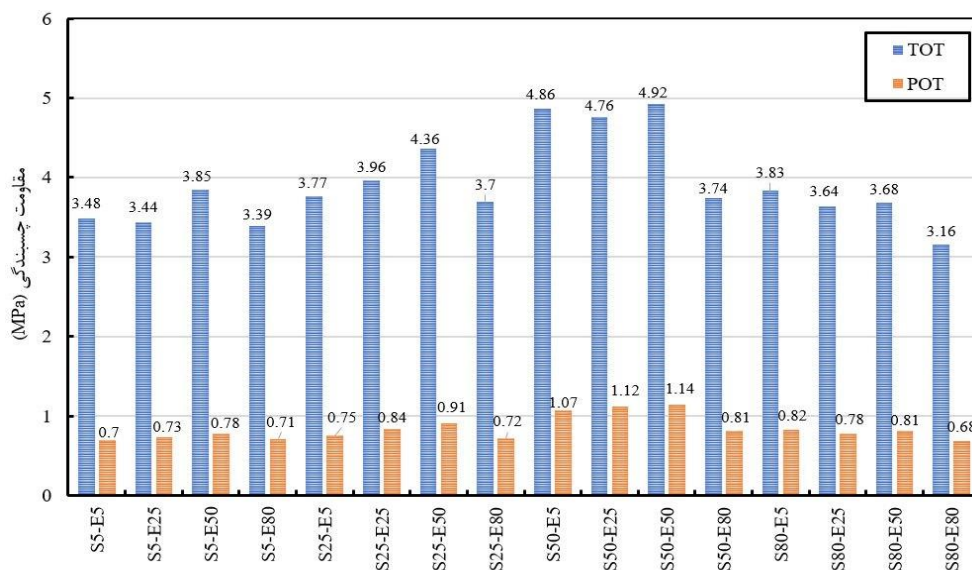
شکل ۸ نمودار تغییرات میانگین مقادیر چسبندگی TOT برای بسترهایی با دمای مختلف در برابر تغییرات دمای اپوکسی

درصد تغییرات مقاومت TOT گروه‌های مختلف، نسبت به نمونه مبنا در جدول (۸) نشان داده شده‌است. براساس نتیجه‌های این جدول، بیشترین افزایش اختلاف چسبندگی مربوط به نمونه ۵۰-۵۰ است که مقاومت چسبندگی ۲۴ درصد افزایش یافته‌است. این در حالی است که نمونه ۸۰-۸۰ بیش از ۲۰ درصد افت مقاومت چسبندگی را تجربه کرده‌است و بیشترین کاهش مقاومت را نسبت به نمونه مبنا داشته‌است.

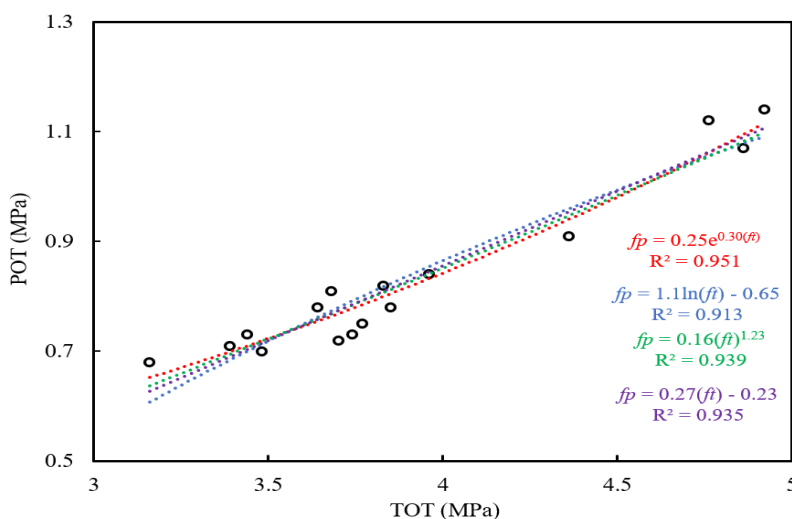
با مقایسه نتیجه‌های به‌دست‌آمده از دو روش POT و TOT و همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، TOT مقادیر بیشتری را برای مقاومت چسبندگی نشان می‌دهد که این

جدول ۸ درصد تغییرات مقاومت چسبندگی TOT گروه‌های مختلف نسبت به نمونه مبنا (۲۵-۲۵) (دمای اپوکسی - دمای بستر)

نمونه	۵-۵	۵-۲۵	۵-۵۰	۵-۸۰	۲۵-۵	۲۵-۲۵	۲۵-۵۰	۲۵-۸۰
اختلاف مقاومت	-۱۲/۱۱	-۱۳/۰۲	-۲۷/۷۹	-۱۴/۴۹	-۴/۹۰	-	۱۰/۲۱	-۶/۴۹
نمونه	۵۰-۵	۵۰-۲۵	۵۰-۵۰	۵۰-۸۰	۸۰-۵	۸۰-۲۵	۸۰-۵۰	۸۰-۸۰
اختلاف مقاومت	۲۲/۶۹	۲۰/۰۹	۲۴/۳۳	-۵/۶۴	-۳/۲۱	-۸/۰۸	-۶/۹۵	-۲۰/۲۹



شکل ۹ مقایسه مقاومت چسبندگی بین دو روش POT و TOT



شکل ۱۰ رابطه مقاومت چسبندگی بین دو روش POT و TOT

مشاهده شده را برای POT و TOT نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش دمای سطح بستر از ۵ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، درصد گونه‌های شکست نوع G افزایش یافته‌است. یادآور می‌شود، گونه شکست G، بیانگر شکست مطلوب سیستم FRP می‌باشد. با افزایش دمای سطح بستر به فراتر از  $T_g$  اپوکسی، درصد گونه‌های شکست نوع F و E افزایش یافته‌است. همچنین با مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان به این نکته اشاره کرد که درصد گونه‌های شکست از نوع F برای TOT بیشتر از POT می‌باشد.

### گونه‌های گسیختگی

نتیجه‌های POT و TOT نشان داد، دمای سطح بستر و اپوکسی علاوه بر تأثیر بر روی مقاومت چسبندگی می‌تواند بر روی گونه‌های شکست نیز اثرگذار باشد. به‌طور کلی، در این پژوهش، سه گونه شکست زیر هنگام انجام آزمایش‌ها مشاهده شد:

۱. شکست پیوستگی بستر سیمانی (گونه G)

۲. شکست سطح تماس (گونه E)

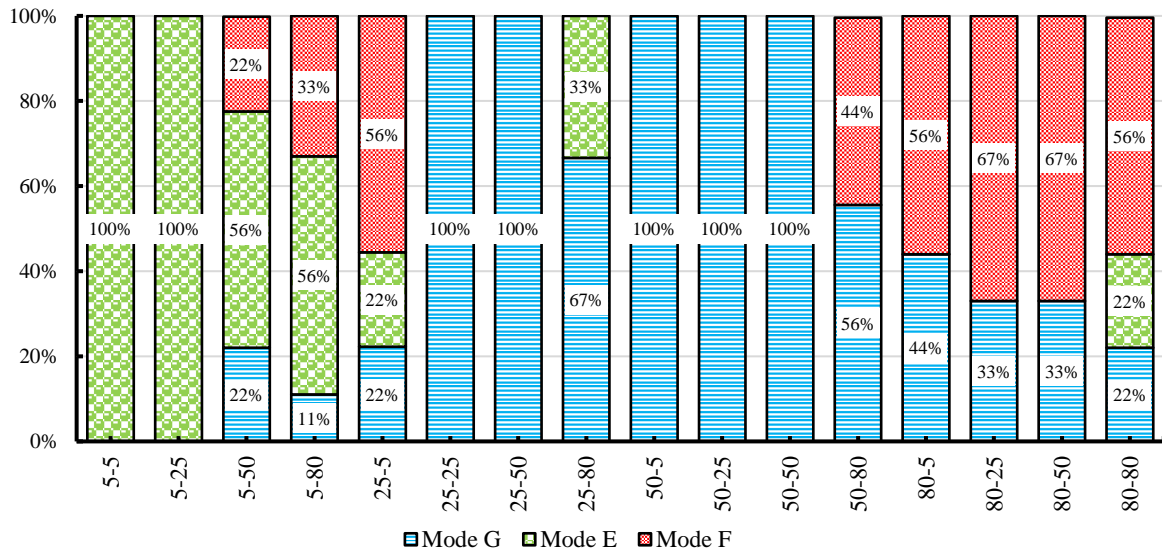
۳. شکست ترکیبی (گونه F)

که در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است.

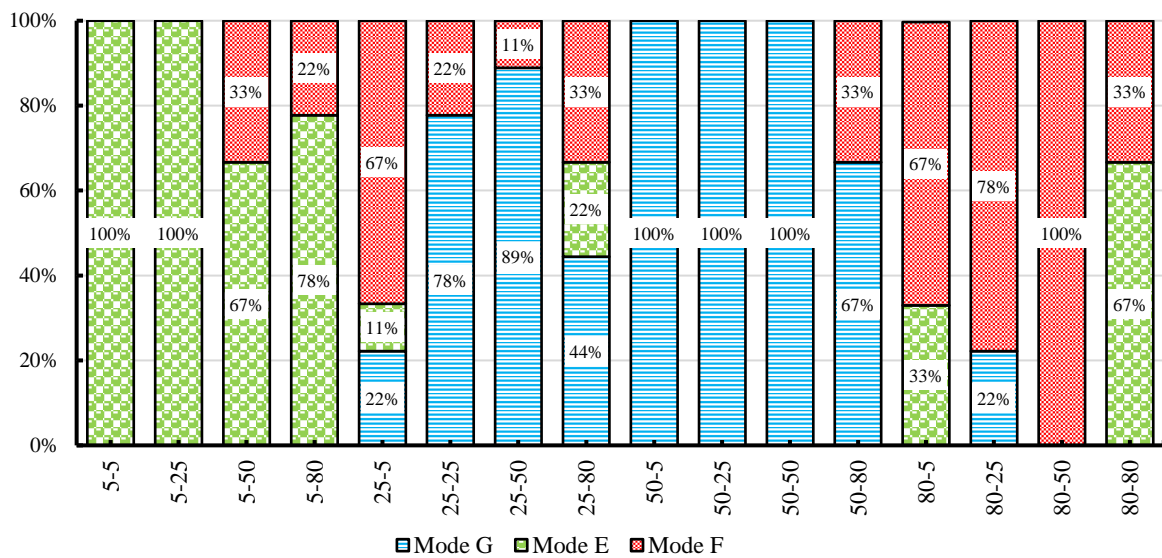
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب، درصد گونه‌های شکست



شکل ۱۱ انواع شکل گونه‌های شکست: (الف) بستر سیمانی (G)، (ب) سطح تماس (E) و (پ) ترکیبی (F)



شکل ۱۲ درصد گونه‌های شکست نمونه‌های مختلف در POT



شکل ۱۳ درصد گونه‌های شکست نمونه‌های مختلف در TOT

جدول ۹ نتایج آزمون ANOVA بر روی مقاومت چسبندگی POT و TOT

سطح معناداری		میانگین مربعات		درجه آزادی	مجموع مربعات		اثر
TOT	POT	TOT	POT		TOT	POT	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۷/۳۴۷	۰/۵۵۱	۳	۲۲/۰۴۲	۱/۶۵۲	دمای بستر ( $T_s$ )
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۳/۴۷۵	۰/۲۶۱	۳	۱۰/۴۲۵	۰/۷۸۴	دمای اپوکسی ( $T_E$ )
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۴۱/۶۷۴	۶/۳۶۵	۱۶	۲۲۶۶/۷۸۱	۱۰۱/۸۳۳	برهم کنش دوگانه دمای بستر و اپوکسی ( $T_s \times T_E$ )

### تجزیه و تحلیل آماری

بر اساس نتایج آزمون ANOVA و سطوح معناداری به دست آمده در جدول (۹)، می توان به این نکته اشاره کرد که دمای سطح بستر، دمای چسب اپوکسی و هم چنین برهم کنش آن ها بر روی مقادیر چسبندگی POT و TOT تأثیر معنی داری دارند. شایان ذکر است، نتایج این بخش منطبق با نتایج ایمانی جاجرمی و همکاران [20] است.

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثر دمای سطح بستر و اپوکسی در هنگام نصب ورق های GFRP بر روی مقاومت چسبندگی با استفاده از دو آزمون POT و TOT مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به مهم ترین نتیجه های به دست آمده بر پایه نمونه های بررسی شده اشاره می شود:

- کاهش دمای سطحی بستر از ۲۵ به ۵ درجه سانتی گراد، موجب افت ۸ تا ۱۶ درصدی مقاومت چسبندگی POT و افت ۳ تا ۱۴ درصدی مقاومت چسبندگی TOT می شود.
- نصب ورق های GFRP بر روی بستری با دمای بستر بالا (۵۰ درجه سانتی گراد) به دلیل افزایش نرخ عمل آوری و ویژگی های اپوکسی، موجب افزایش ۳۳ و ۲۰ درصدی مقاومت چسبندگی POT و TOT می شود. افزایش بیشتر دما با دمای بستر ۸۰ درجه سانتی گراد، میزان کاهش مقاومت چسبندگی برای دو روش POT و TOT به ترتیب، ۷ و ۸ درصد بود.

- برای بستری با دمای کمتر از دمای استاندارد آزمایشگاهی، با افزایش دمای چسب تا کمتر از  $T_g$  اپوکسی، می توان اثر منفی دمای پایین سطح بستر را تا حدی جبران کرد.
- نتیجه های دو روش POT و TOT نشان داد، برای بستری با دمای نزدیک به  $T_g$  اپوکسی، گرم کردن اپوکسی تا دمای ۵۰ درجه سانتی گراد به دلیل افزایش ویژگی های مکانیکی، سبب افزایش مقاومت سامانه تقویتی GFRP می شود.
- برای بستری که دمای سطحی بیشتری از  $T_g$  اپوکسی دارد، کاربرد اپوکسی با دمای پایین تر در هنگام نصب، می تواند در عملکرد سامانه تقویتی GFRP تأثیر مثبت داشته باشد. مقاومت چسبندگی بستر ۸۰ درجه سانتی گراد، هنگامی که از چسب ۵ درجه سانتی گراد به جای چسب ۲۵ درجه سانتی گراد استفاده شود، ۵ درصد افزایش نشان می دهد.
- با استفاده از تحلیل های آماری و درون یابی خطی و بر پایه نتیجه های آزمایشگاهی گزارش شده در این پژوهش، روابطی به منظور پیش بینی میزان چسبندگی POT و TOT ارائه شد.
- بر اساس نتیجه های آزمایشگاهی و تحلیل درون یابی غیرخطی انجام شده، وجود یک رابطه نمایی بین دو روش POT و TOT تأیید شد.
- باتوجه به بستر، پارچه الیافی شیشه ای، اپوکسی و بازه دمایی مورد بررسی در این پژوهش، سه گونه شکست مشاهده شد.
- دمای بستر نزدیک به ۵۰ درجه سانتی گراد، گونه شکست G (گونه قابل قبول).
- دمای فراتر از  $T_g$  اپوکسی، افزایش گونه های شکست E و F (افت در عملکرد چسبندگی اپوکسی به بستر).



فردوسی مشهد به عنوان بخشی از طرح شماره ۵۲۰۰۸ انجام گرفته است. نویسندگان از همکاری های پرسنل آزمایشگاه سازه گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد و مؤسسه تحقیقاتی پرتاوس کمال تشکر را دارند.

۱۱. نتایج تحلیل آماری ANOVA نشان داد که دمای سطح بستر و اپوکسی، دو عامل تأثیرگذار بر مقاومت چسبندگی سیستم های FRP می باشد.

### سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه

### مراجع

1. Saadatmanesh, H., and Malek, A. M., "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, No. 4, pp. 158-164, (1998).
2. Mostofinejad, D., and Hosseini, S. J., "Simulating FRP Debonding from Concrete Surface in FRP Strengthened RC Beams: A Case Study", *Scientia Iranica, International Journal of Science and Technology, Transactions A, Civil Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 452-456, (2017).
3. Khorasani, A. M., Esfahani, M. R., and Sabzi, J., "The Effect of Transverse and Flexural Reinforcement on Deflection and Cracking of GFRP Bar Reinforced Concrete Beams", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 161, No. 3, pp. 530-546, (2019).
4. Blackburn, BP., Tatar, J., Douglas, EP., and Hamilton, HR., "Effects of Hygrothermal Conditioning on Epoxy Adhesives Used in FRP Composites", *Construction and Building Materials*, Vol. 96, No. 10, pp. 679-689, (2015).
5. Djouani, F., Connan, C., Delamar, M., Chehimi, MM., and Benzarti, K., "Cement Paste-Epoxy Adhesive Interactions", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 411-423, (2011).
6. Stewart, A., "Study of Cement-Epoxy Interfaces, Accelerated Testing, and Surface Modification", PHD Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL, (2012).
7. Chen, C., Li, X., Zhao, D., Huang, Z., Sui, L., and Xing, F., "Mechanism of Surface Preparation on FRP-Concrete Bond Performance: A Quantitative Study", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 163, No. 4, pp. 193-206, (2019).
8. Varun, N., Sudarshan, G., Shivaraj, A., and Sridevi, G., "Rehabilitation and Retrofitting of Structural Elements Using Various Fibers", *Resilient Infrastructure*, Vol. 202, No. 1, pp. 187-193, (2022).
9. Chothe, O.K. and Agrawal, V. M., "An Experimental Investigation on Applications of Fiber-Reinforced Composites for Rehabilitation of Concrete Beams", *Resilient Infrastructure*, Vol. 202, No. 1, pp. 415-425, (2022).
10. Zhang, P., Lv, X., Zhang, H., Liu, Y., Chen, B., Gao, D., and Sheikh, SA., "Experimental Investigations of GFRP-Reinforced Columns with Composite Spiral Stirrups under Concentric Compression", *Journal of Building Engineering*, Vol. 46, No. 4, pp. 103768, (2022).
11. ACI Committee 440., "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440. 2R-17)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2017).
12. AASHTO-FRPS-1., "Guide Specifications for Design of Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., (2010).

13. *fib* Bulletin 14., "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures", International federation for structural concrete (*fib*), Lausanne, Switzerland, (2001).
14. Aiello, M., Frigione, D., and Acierno, D., "Effects of Environmental Conditions on Performance of Polymeric Adhesives for Restoration of Concrete Structures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 185-189, (2002).
15. Banea, M., Silva, LFM., and Campilho, R., "Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 939-953, (2012).
16. Nguyen, T., Bai, Y., Zhao, X., and Al-Mahaidi, R., "Mechanical Characterization of Steel/CFRP Double Strap Joints at Elevated Temperature", *Composite Structure*, Vol. 93, No. 6, pp. 1604-1612, (2011).
17. Leone, M., Matthys, S., and Aiello, MA., "Effect of Elevated Service Temperature on Bond between FRP EBR Systems and Concrete", *Composites Part B*, Vol. 40, No. 1, pp. 85-93, (2009).
18. Blontrock, H., Taerwe, L., and Vanwalleghem, H., "Bond Testing of Externally Glued FRP Laminates at Elevated Temperature", international conference on bond in concrete-from research to standard, Budapest, Hungary, (2002).
19. Attari, B., and Tavakkolizadeh, M., "An Experimental Investigation on Effect of Elevated Temperatures on Bond Strength between Externally Bonded CFRP and Concrete", *Steel and Composite Structures*, Vol. 32, No. 5, pp. 559-569, (2019).
20. Imani Jajarmi, P., Tavakkolizadeh, MR., and Youssefi, A., "Effect of Temperature and Moisture on the Bond Strength between FRP Laminates and Cement-Based Mortar Substrates", *Structural Concrete*, Vol. 22, No. 6, pp. 1-23, (2022).
21. Myers, J., and Ekenel, M., "Effect of Environmental Conditions on Bond Strength between CFRP Laminate and Concrete Substrate", Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES), *Special Publication*, Vol. 230, No. 1, pp. 1571-1592, (2005).
22. Al-Shawaf, A., Al-Mahaidi, R., and Zhao, X., "Study on Bond Characteristics of CFRP/Steel Double Lap Shear Joints at Subzero Temperature Exposure", 3<sup>rd</sup> international conference on FRP composites in civil engineering (CICE), Miami, FL, (2006).
23. Kim, Y., Hossain, M., and Yoshitake, I., "Cold Region Durability of a Two-Part Epoxy Adhesive in Double-Lap Shear Joints: Experiment and Model Development", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 36, No. 11, pp. 295-304, (2012).
24. Malhotra, V.M., and Carino, N.J., "Non-Destructive Testing of Concrete", Boca Raton, New York, Washington D.C. 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press LLC, (2004).
25. ASTM Standard D4541-17., "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, West Conshohocken, PA, (2017).
26. ASTM Standard D7522-15., "Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete Substrate, West Conshohocken, PA, (2015).
27. ASTM Standard D7234-19., "Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of

- Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers", West Conshohocken, PA, (2019).
28. CNR-DT 200., "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures", National Research Council, Italy, (2004).
29. BS EN 1542., "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Measurement of Bond Strength by Pull-Off", British Standard Institution, (1999).
30. Naderi, M., "New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 35, No. 6, pp. 602-608, (2007).
31. Shrestha, J., Ueda, T., and Zhang, D., "Durability of FRP Concrete Bonds and its Constituent Properties under the Influence of Moisture Conditions", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 201-215, (2015).
32. Ouyang, Z., and Wan, B., "Experimental and Numerical Study of Water Effect on Bond between FRP and Concrete in Moist Environments", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 2, pp. 205-223, (2008).
33. Carbas, RJC., Marques, EAS., Da Silva, LFM. and Lopes, AM., "Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives", *The Journal of Adhesion*, Vol. 90, No. 1, pp. 104-119, (2014).
34. Ekenel, M., Myers, J. and Khataukar, A., "Effect of Environmental Conditions During Installation Process on Bond Strength between CFRP Laminate and Concrete Substrate", *3<sup>rd</sup> international conference composites in construction, Lyon, France*, (2005).

