

راهنمای عملی و مهندسی آزمون کشش سطحی (Pull-Off Test) در سیستم‌های FRP

بررسی الزامات پذیرش چسبندگی، تشریح نحوه انجام، خطاهای فاحش مراجع آزمایشگاهی و تفکیک انواع مدهای شکست

استانداردسازی کنترل کیفیت

بر پایه ۲۰ سال سابقه اجرایی

دستورالعمل کارگاهی

مقدمه و مزیت تجربی بیکران سازان شمال:

مطالبی که در این مرجع مطالعه می‌کنید، برخلاف بسیاری از وب‌سایت‌ها، صرفاً ترجمه کلیشه‌ای یا رونویسی ناقص از متن استاندارد ASTM نیست. این راهنما حاصل ****بیش از ۲۰ سال تجربه میدانی و کارگاهی تخصصی شرکت بیکران سازان شمال**** در حوزه الیاف کامپوزیت پلیمری و رزین‌های سازه‌ای است که جهت اشتراک تجربیات با مشاوران، ناظران و کارفرمایان محترم تدوین گردیده است.

۱. مبانی و ضرورت آزمون کشش سطحی (Pull-Off Test)

متداول‌ترین و مطمئن‌ترین روش برای ارزیابی کیفیت نصب سیستم‌های FRP، کنترل یکنواختی رزین اپوکسی و سنجش مقاومت چسبندگی چسب ساختاری به بستر بتن، انجام تست Pull-Off بر اساس ضوابط استاندارد ASTM D7522 / D7522M می‌باشد.

۲. حداقل مقادیر مجاز مقاومت چسبندگی (Bonding Strength)

در تعیین معیار پذیرش یا رد چسبندگی، دو ضابطه آیین‌نامه‌ای و مشخصات محصول مطرح است:

- **مشخصات فنی رزین‌ها (TDS سازنده):** در برگه‌های اطلاعات فنی ژل‌ها و رزین‌های اپوکسی استاندارد، مقاومت چسبندگی کششی معمولاً حداقل **2.5 MPa** ذکر می‌گردد.
- **دستورالعمل ACI 440.2R-17:** بر اساس ضوابط صریح این آیین‌نامه، حداقل مقاومت چسبندگی کششی لازم برای کارکرد صحیح سیستم تقویتی FRP، مقدار **1.4 MPa** (حدود ۱۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) تعیین گردیده است.

۳. تشریح گام‌به‌گام مراحل اجرایی تست Pull-Off

پس از اشباع کامل الیاف با رزین و سپری شدن زمان گیرش نهایی و پخت (Curing) چسب اپوکسی، مراحل ذیل انجام می‌پذیرد:

1 **برش شیار دایره‌ای (مغزه‌گیری سطحی):** با استفاده از دستگاه کرگیر و مته گردبر با قطر اسمی ۵۰ میلی‌متر، برشی دایره‌ای از روی الیاف به عمق ۱۲ میلی‌متر به داخل عمق بتن پایه زده می‌شود.

2 **نصب صفحه فلزی (Dolly):** صفحه فلزی مخصوص (دالی) به قطر ۵۰ میلی‌متر با چسب اپوکسی زودگیر و بسیار پرمقاومت روی سطح شیارخورده الیاف چسبانده می‌شود.

3 **اعمال بار کششی:** پس از کیورینگ کامل چسب دالی، دستگاه پول‌آف مکانیکی یا هیدرولیکی روی آن سوار شده و نیروی کشش عمودی مستقیم اعمال می‌گردد تا شکست رخ دهد.

4 **ثبت نتایج:** دستگاه مقدار بار نهایی گسیختگی را اندازه‌گیری کرده و بر حسب مگاپاسکال (MPa) یا تنش کششی گزارش می‌دهد.

۴. ارزیابی مد شکست (Failure Mode)؛ شرط اساسی پذیرش تست

بر اساس استاندارد ASTM D7522، صرفاً ثبت یک عدد مگاپاسکال ملاک قبولی سیستم نیست، بلکه «محل و نحوه شکست» تعیین کننده اصلی صحت عملیات بهسازی است:

شرط قطعی قبولی و پذیرش تست:

شکست حتماً باید در

داخل لایه بتن (Concrete Substrate Failure)

رخ دهد؛ بدین معنی که کنده شدن الیاف با کنده شدن تکه‌ای از بتن همراه باشد.

اگر شکست در لایه رزین اپوکسی رخ دهد یا مقاومت کششی پیوستگی زیر 1.4 MPa ثبت شود و شکست داخل بتن نباشد، سیستم مردود است. حتی اگر رزین مقاومتی بسیار بالا داشته باشد ولی بتن تخریب نگردد، کیفیت لایه اتصال زیر سوال است.

۵. اشتباهات رایج آزمایشگاه‌ها و خطاهای تفسیری خطرناک

در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی، به دلیل کمبود تجربه یا تفسیر اشتباه مراجع تست، خطاهای فاحشی گزارش می‌شود که می‌تواند خسارت مالی و حقوقی سنگینی به پیمانکار و کارفرما وارد کند:

اشتباه اول: عدم رعایت عمق استاندارد کرگیری (مته‌کاری سطحی)

طبق صریح استاندارد ASTM D7522، عمق شیار داخل بتن باید حداقل ۱۲ میلی‌متر باشد. اگر کرگیری کمتر از این عمق زده شود، موجب تخریب و لایه‌لایه شدن (Delamination) الیاف FRP از هم می‌شود و مقاومت چسبندگی به اشتباه رد خواهد شد.

اشتباه دوم: عدم کالیبراسیون و انطباق سنسور دستگاه پول‌آف

سرعت بارگذاری در تست کشش سطحی باید کاملاً یکنواخت و با نرخ تنظیم‌شده پیوسته اعمال گردد. متأسفانه در مواردی مشاهده شده که در آزمایشگاه‌ها تنها صفحه نمایشگر دستگاه چک شده و سنسور داخلی کالیبره کارخانه سازنده نیست. نتیجه نمایشگر، نیروهای کششی را با ضریب کالیبراسیون دستگاه دیگری نشان داده و اعداد را به شدت پایین و غیرواقعی اعلام می‌کند.

اشتباه سوم: گزارش نتایج زیر سطح به عنوان مقاومت واقعی چسبندگی

در مواردی که عمق کرگیری ناکافی بوده یا اتصال دالی معیوب است، اعداد پایینی چون 0.8 MPa اعلام می‌شود؛ در صورتی که این مقدار ناشی از خطای روش آزمون است و به عنوان عدم کیفیت چسب و الیاف تفسیر می‌گردد که این تفاسیر غلط، نتیجه عدم تسلط بر مبانی ASTM است.

۶. خلاصه چک‌لیست و مراجع کنترلی در یک نگاه

پارامتر کنترلی	مقدار / ضابطه الزام استاندارد	مرجع استاندارد
قطر دالی فولادی (Dolly)	۵۰ میلی‌متر (اسمی)	ASTM D7522
عمق مغزه‌گیری در بتن بستر	حداقل ۱۲ میلی‌متر (۱۲ mm) داخل بتن	ASTM D7522
حداقل مقاومت چسبندگی کششی	$\leq 1.4 \text{ MPa}$	ACI 440.2R-17
مقاومت چسبندگی اسمی رزین	$\leq 2.5 \text{ MPa}$	TDS کارخانه سازنده
مد شکست مورد قبول (Failure Mode)	شکست قلوه‌کن در عمق بتن (بیش از ۸۵٪)	ASTM D7522 / ACI
کنترل دستگاه پول‌آف	کالیبراسیون رسمی سرعت و سنسور بار	ISO / ASTM

مشاوره تخصصی و خدمات کنترل کیفی:

شرکت مهندسی بیکران سازان شمال با در اختیار داشتن دستگاه‌های کالیبره تست Pull-Off و تیم مجرب نظارتی، آمادگی کامل خود را جهت ارائه خدمات بازرسی، مشاوره، تست‌های کارگاهی معتبر و کنترل کیفیت پروژه‌های بهسازی در سراسر کشور اعلام می‌دارد.