

# معرفی روشی نوین در اتصال فلزات به مواد مرکب

روح‌اله حسینی\*

عضو باشگاه پژوهشگران جوان

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

r.hosseini.mech@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

## چکیده

در این مقاله، کاربرد روش عملیات سطحی جدیدی با نام حکاکی سطح<sup>۱</sup> در سیستم اتصال جدید فلزات به مواد مرکب به نام اتصال درگیر یا کاملد<sup>۲</sup> ارزیابی و در ادامه میزان بهبود کارایی این نوع اتصال بررسی شده است. داده‌ها نشان می‌دهند که اتصال درگیر از شکست خط اتصال ناگهانی جلوگیری می‌کند و شکست تدریجی‌تر، با قابلیت شناسایی بیشتر را نسبت به اتصالات معمولی ایجاد می‌نماید. همچنین این نوع اتصال، بیش از دو برابر اتصالات معمولی انرژی جذب می‌کند.

**واژگان کلیدی:** اتصال فلز به کامپوزیت، اتصال درگیر، اتصال کاملد، حکاکی سطح

## ۱. مقدمه

می‌دهند که در مواد مرکب، آزادسازی تنش در حوالی محل تمرکز تنش بسیار ناچیز است. کامپوزیت‌های تک‌جهته آسیب‌پذیرند و کارایی اتصالات در آنها بسیار پایین است. اما اگر درجه ناهمسانگردی<sup>۳</sup> در حوالی سوراخ کاهش یابد، تمرکز تنش به صورت موضعی در آن منطقه کم می‌شود. استفاده از الیاف در راستاهای گوناگون و ایجاد رفتار شبه‌پلاستیک به صورت جداشدن، تورق و ترک ماتریسی از جمله روش‌های کاهش درجه ناهمسانگردی است [۵]. طبیعت ترد مواد مرکب سبب می‌شود تا با شکست یکی از اتصالات مکانیکی، قطعه قادر به توزیع مجدد تنش نباشد؛ لذا محاسبه دقیق مقدار بار برشی بین اتصالات و شناسایی

امروزه سه روش عمده برای اتصال مواد مرکب به خودشان و یا دیگر مواد همچون فلزات، سرامیک‌ها، پلاستیک‌ها و جز این‌ها وجود دارد. این روش‌ها به ترتیب عبارت‌اند از: اتصال چسبی، اتصال مکانیکی و نهایتاً ترکیب موارد اول و دوم. اتصالات چسبی شامل مواد مرکب می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که چسب بارهایی بیشتر از استحکام ماده اصلی را تحمل کند و اتصالات طراحی شده در اثر اعمال بارهای خستگی دچار شکست نشوند [۱-۴]. اتصالات مکانیکی در مواد نرم و ایزوتروپیک نظیر فلزات به خوبی شناخته شده‌اند. در این مواد، تسلیم سبب کاهش تمرکز تنش در حوالی سوراخ پیچ می‌شود. مطالعات اخیر نشان

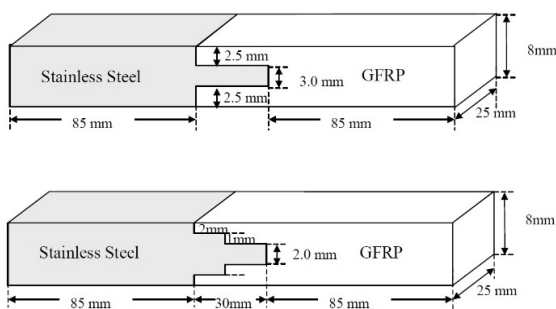


## ۲. اتصالات درگیر

امروزه با استفاده از روش حکاکی سطح و کاربردهای آن در فرایند اتصال درگیر یا کاملد، می‌توان تا حدودی بر عیوب اتصالات چسبی و مکانیکی فائق آمد و به استحکام‌های بالا در اتصال دست یافت [۷-۹].

### ۲-۱. آماده‌سازی نمونه

در شکل ۱، هندسه دو نوع اتصال انتخابی برای تست نمایش داده شده است. برای هر نوع اتصال، ۱۰ نمونه فولاد زنگ‌نزن برای ایجاد فرم دلخواه ماشینکاری شده است؛ پنج نمونه نخست با روش گریت بلاست<sup>۴</sup> و پنج نمونه دیگر با روش جدید حکاکی سطح - که برای ایجاد اتصال کاملد به کار می‌رود - ساخته شدند.

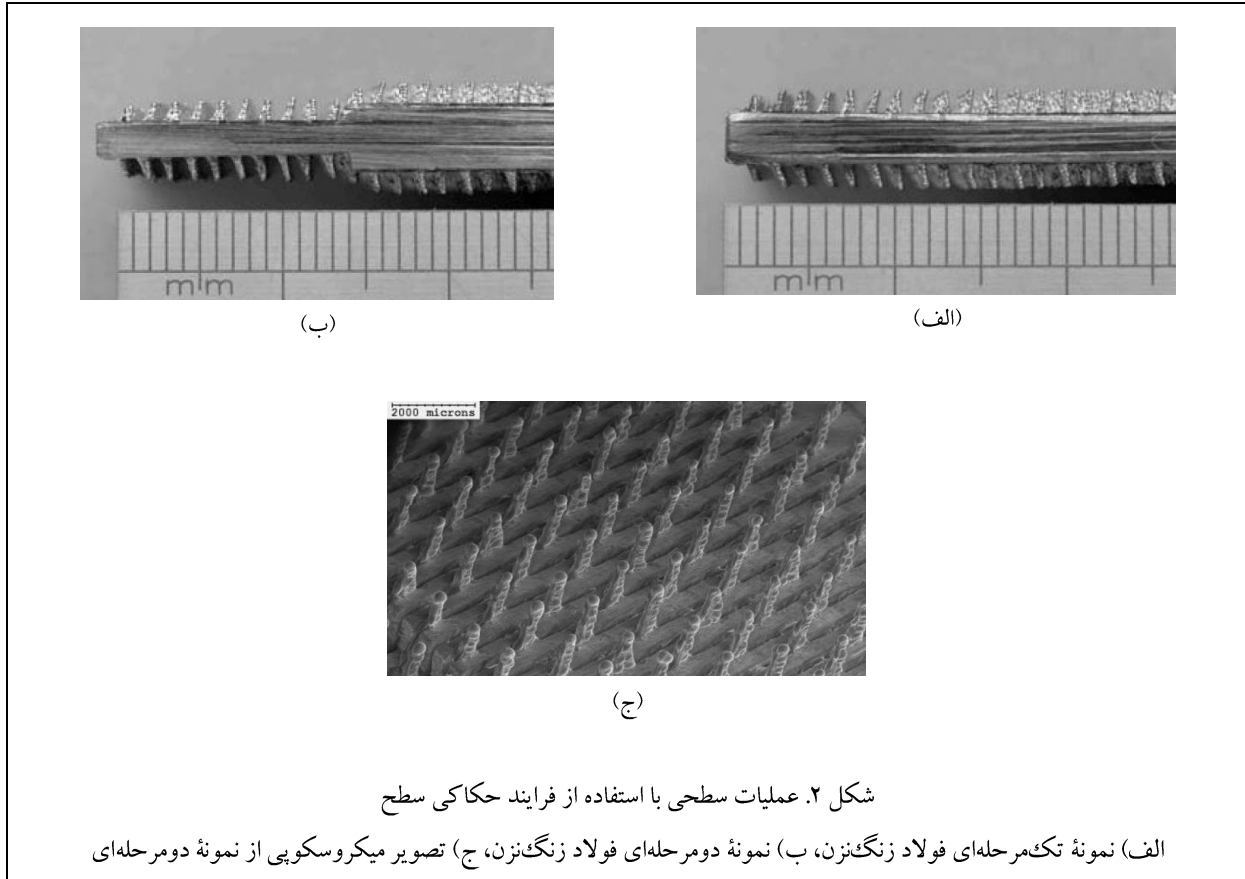


شکل ۱. نمایی از هندسه دو نوع اتصال انتخابی

در قسمت‌های الف و ب از شکل ۲، نمونه‌هایی از سطوح که با استفاده از این عملیات سطحی ساخته شده‌اند، به نمایش درآمده است. این عملیات سطحی می‌تواند برای ایجاد برآمدگی‌هایی در فلز در غالب شکل‌ها و اندازه‌های گوناگون به کار رود. قسمت ج از این شکل نیز یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۵</sup> از نمونه فولادی زنگ‌نزن دوپله‌ای با عملیات سطحی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به ازای هر برآمدگی یک سوراخ در فلز وجود دارد. مرحله ماشینکاری در اتصال هنوز کاملاً واضح در گوشه پایین سمت چپ تصویر مشاهده می‌شود و با عملیات سطحی از بین نرفته است.

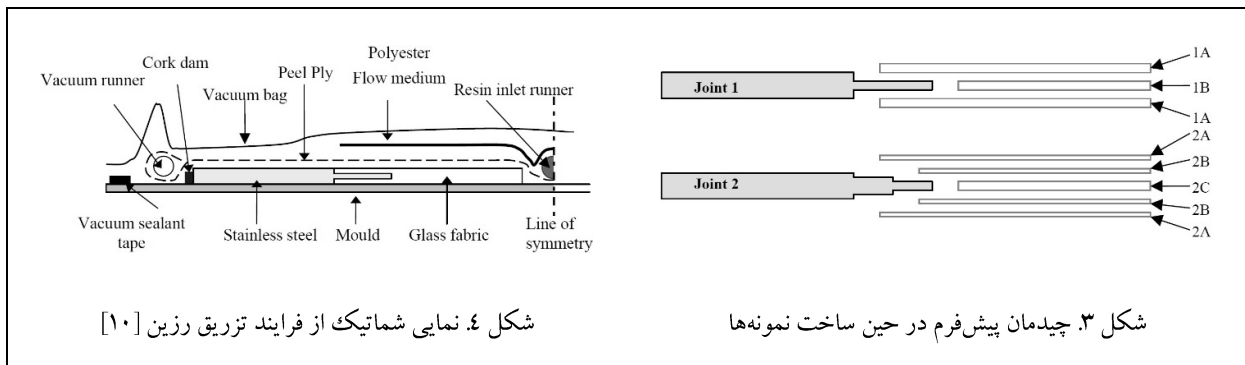
موقعیت بارهای بحرانی امری بسیار مهم است. اتصالات مکانیکی شامل مواد مرکب در مقایسه با اتصالات چسبی می‌توانند به‌سادگی دمونتاز شوند. این امر به دلیل امکان انجام بازرسی، تعمیر و بازسازی، استفاده از آنها را در مقایسه با سایر اتصالات جذاب‌تر می‌کند. به همین دلیل، در بخش‌هایی از صنعت که با فلزات در ارتباطند، استفاده از اتصالات مکانیکی برای اتصال به مواد مرکب و سایر مواد رایج‌تر است. در ادامه مزایا و معایب اتصالات چسبی در مقایسه با اتصالات مکانیکی بیان می‌شود [۶]. مزایای اتصالات چسبی به ترتیب عبارت‌اند از:

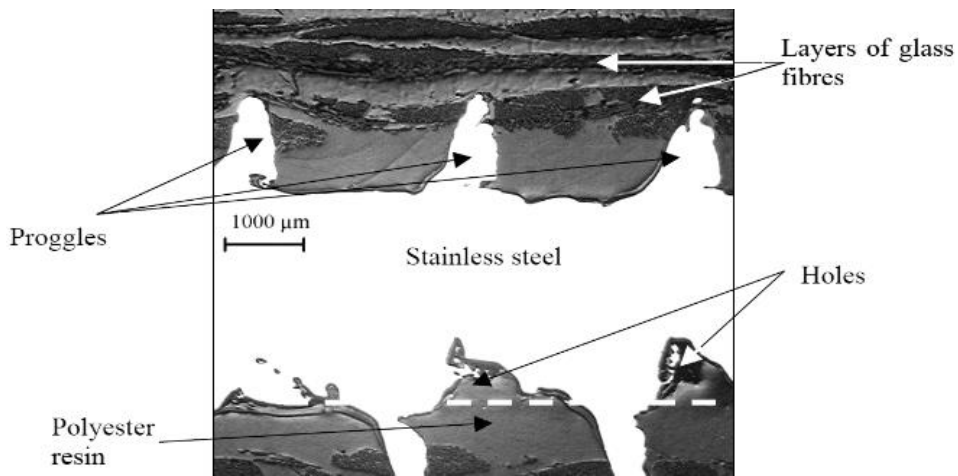
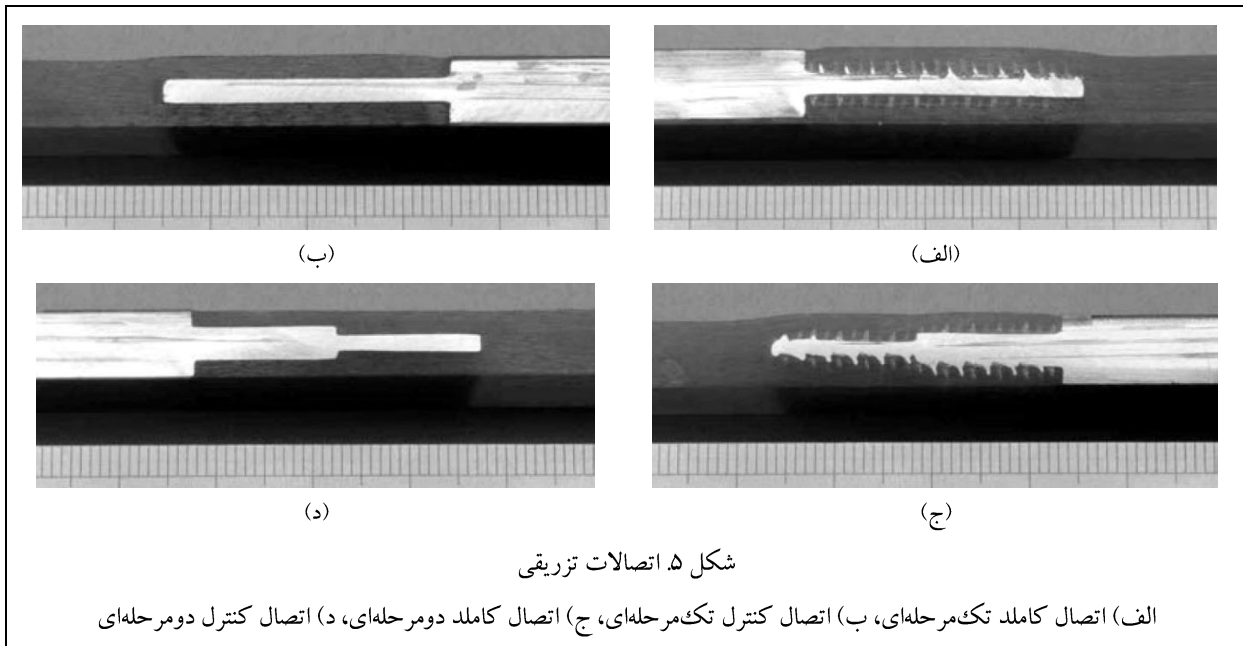
۱. توانایی ایجاد سازه‌های مستحکم سبک‌تر
  ۲. توانایی اتصال مواد غیرمشابه
  ۳. توانایی اتصال ورق‌های نازک
  ۴. بهبود توزیع تنش
  ۵. خواص خستگی مناسب به دلیل بهبود توزیع تنش
  ۶. کاهش خوردگی گالوانیک با استفاده از لایه میانی نارسانا
  ۷. کیفیت سطح بهتر
  ۸. امکان اتوماسیون‌نمودن فرایند اتصال
- از طرفی، معایب استفاده از اتصالات چسبی در مقایسه با اتصالات مکانیکی به قرار زیر است:
۱. عدم امکان دمونتاز ساده
  ۲. امکان ایجاد تنش‌های پسماند به دلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی
  ۳. محدودیت در اتصال پیکربندی‌های ضخیم
  ۴. حساسیت به تنش در جهت ضخامت
  ۵. مقاومت پایین در دماهای بالا
  ۶. مستعد تخریب در شرایط بسیار سخت محیطی
  ۷. مسائل آتش‌زایی، سمی بودن و سختی انجام بازرسی
- گاهی برای رفع عیوب هر نوع اتصال، از اتصالات هیبریدی شامل ترکیب اتصالات چسبی و مکانیکی استفاده می‌شود. چنین روشی اهداف و مزایای اصلی استفاده از کامپوزیت‌ها همچون اندازه، وزن و هزینه مناسب را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شده‌اند. باید توجه داشت که برای وضوح بیشتر تنها یک ست نشان داده شده است. برای تمام نمونه‌های ایجاد شده، رزین استفاده شده هم به‌عنوان ماتریس ماده مرکب و هم چسب استفاده می‌شود. پس از تزریق رزین، لمینیت برای مدت ۱۹ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد پخته می‌شود و برای مدت ۲۱ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد پخت نهایی یا پس‌پخت می‌گردد. در شکل ۵ ناحیه اتصال نمونه‌های انتخابی نمایش داده شده است.

برای هر دو طراحی اتصال و هر دو نمونه کنترل و کاملد، اتصال توسط خواباندن پارچه‌های  $400 \text{ g/m}^2$  plain woven E-glass روی نمونه‌های فلزی همراه با روش VIP<sup>۶</sup> و رزین Crystic<sup>®</sup> 489PA در الیاف شیشه انجام می‌شود. لایه‌نشانی و جزئیات شکل پیش‌فرم در شکل ۳ و جدول ۱ نشان داده شده است. در شکل ۴ نیز نمای شماتیک از فرایند تزریق رزین نمایش داده شده است. خط تقارن شامل دو نمونه می‌باشد که با یک بار تزریق ایجاد





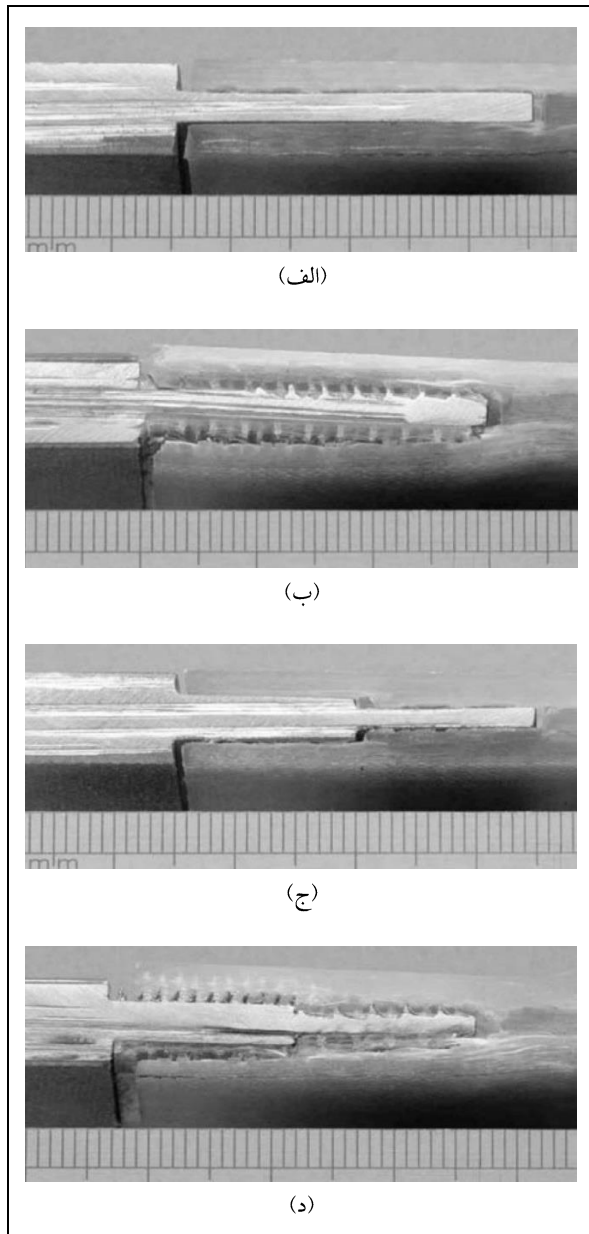
جدول ۱. توصیف لایه‌های پیش‌فرم

لایه	توالی قرارگیری و موقعیت
1A	(0/90)8
1B	(0/90)9
2A	(0/90)6
2B	(0/90)3
2C	(0/90)7

پلی‌استر<sup>۷</sup> است را نمایش می‌دهد. برای تمایز بهتر الیاف پارچه و رزین پلی‌استر، فولاد زنگ‌نزن در شکل در معرض

شکل ۶ یک میکروگراف از اتصال شامل برآمدگی‌های فولاد زنگ‌نزن که در تماس با الیاف شیشه تقویت‌شده با

در شکل ۹ مثال‌هایی از نمونه‌های شکسته شده برای هر دو نوع اتصال نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ نیز سازوکار آسیب، قبل و در حین شکست نمونه‌ها نمایش داده شده است.



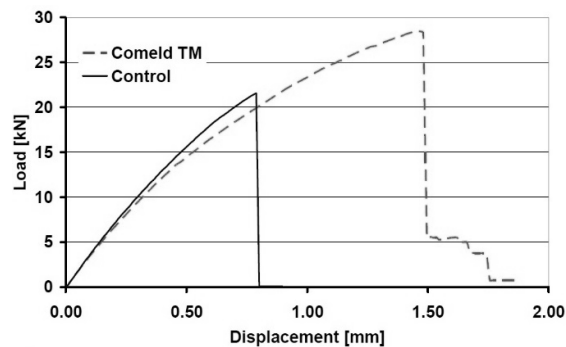
شکل ۹. نمونه‌های کنترل و کاملد آسیب دیده

- الف) تک‌پله‌ای، نمونه کنترل
- ب) تک‌پله‌ای، نمونه کاملد
- ج) دوپله‌ای، نمونه کنترل
- د) دوپله‌ای، نمونه کاملد

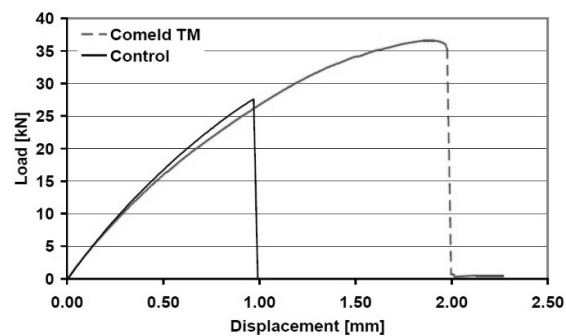
نور زیاد قرار گرفته و سفید به نظر می‌رسد. ملاحظه می‌شود که برآمدگی‌ها تا درون الیاف شیشه گسترش یافته‌اند و رزین پلی‌استر تا خود فولاد زنگ‌نزن (بدون هیچ فاصله‌ای) نفوذ کرده است. نمونه طوری بریده شده است که سوراخ‌های امتداد یافته درون فلز در سطح پایینی فولاد زنگ‌نزن نیز تشریح شده‌اند. خطچین سفید بیانگر سطح نمونه فولاد زنگ‌نزن و به عبارت دیگر جایی است که سوراخ‌ها شروع شده‌اند. تغییر رنگ سوراخ‌ها به علت شکل نامنظم آنهاست.

## ۲-۲. تست و نتایج

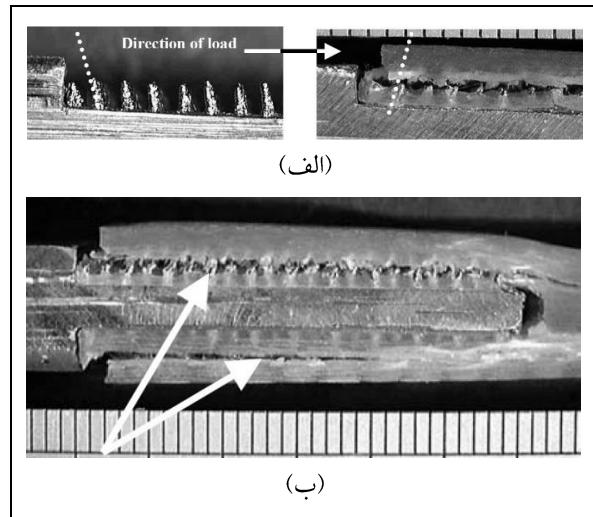
چهار نمونه کنترل و چهار نمونه کاملد برای هر نوع اتصال تحت بارگذاری کششی با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته تا بشکنند. نمودارهای بار - جابه‌جایی برای اتصال تک‌پله‌ای و دوپله‌ای به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷. منحنی بار - جابه‌جایی برای نمونه‌های تک‌پله‌ای



شکل ۸. منحنی بار - جابه‌جایی برای نمونه‌های دوپله‌ای



شکل ۱۰. سازوکارهای آسیب در نمونه‌های کاملد  
الف) زاویه برآمدگی‌ها قبل و بعد از انجام تست  
ب) شکست برشی در کامپوزیت

### ۳. بحث و بررسی

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که اتصالات کاملد بین فولاد زنگ‌نزن و کامپوزیت الیاف شیشه تقویت‌شده با پلی‌استر با استفاده از تزریق خلأ، با موفقیت و بدون هیچ فضای خالی قابل مشاهده ساخته شده است. منحنی‌های بار - جابه‌جایی نمایش داده‌شده در شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که اتصالات کاملد تست‌شده دارای ظرفیت تحمل بار بیشتری از اتصالات کنترل می‌باشند. سطح زیر منحنی‌های بار - جابه‌جایی مربوط به انرژی جذب‌شده در حین شکست نمونه‌هاست. برای هر دو نوع اتصال، انرژی جذب‌شده توسط اتصال کاملد بیشتر از دو برابر انرژی اتصال کنترل است. قسمت‌های الف و ج از شکل ۹ نشان می‌دهند که در نمونه‌های کنترل، شکست در خط اتصال رخ داده است. همان‌طور که از روی تغییرات یکباره در شیب منحنی مربوطه (خط توپر) در شکل‌های ۷ و ۸ مشخص شده است، این شکست‌ها بسیار ناگهانی بوده‌اند. از طرفی در شکست این نمونه‌ها، آسیب وارده به فلز یا لایه‌های کامپوزیتی بسیار ناچیز بوده است. در نمونه‌های کاملد، خط اتصال در بارهای کم آسیب ندیده است. لذا

اتصال قادر است تا به بارهایی که در آنها آسیب در ماده کامپوزیتی دیده شده برسد. با توجه به بخش‌های الف و ب از شکل ۱۰ می‌توان دریافت که قبل از شکست کامپوزیت، برآمدگی‌های فلز تغییر شکل داده‌اند. برآمدگی‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند تا در جهت خلاف بار اعمالی قرار بگیرند (قسمت الف از شکل ۱۰). پس از شکست اتصال، برآمدگی‌ها در جهت بار اعمالی شکل گرفته‌اند (قسمت ب از شکل ۱۰). نمونه‌های کاملد در اثر واماندگی برشی کامپوزیت، دقیقاً پس از مرز برآمدگی‌ها دچار شکست شدند (قسمت ج از شکل ۱۰). یک نکته مهم در مورد نمونه‌های کاملد این است که شکست این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های کنترل که دچار شکست ناگهانی شدند، بسیار تدریجی بوده است. در اثر آسیب ایجادشده در جنس کامپوزیت، قبل از شکست اتصال، نوفه و سروصدا شنیده شده و نمودار بار - جابه‌جایی برای نمونه‌های کاملد دارای تغییرات شیب بیشتری نسبت به نمونه‌های کنترل می‌باشند و همچنین در هنگام شکست نهایی، افتادن بار نسبت به نمونه‌های کنترل به آن شدت ناگهانی نیست. در مورد نمونه‌های تک‌پله‌ای، همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، پس از اولین افتادن بار، اتصال مقدار کمی از بار را برای مدت زمان کوتاهی توانست تحمل کند. نشانه‌های بیان‌شده در مورد وقوع شکست در یک اتصال می‌تواند به یافتن عیب در هنگام سرویس سازه قبل از وقوع شکست ناگهانی کمک کند.

### ۴. نتیجه‌گیری

امروزه در صنایع تولید گوناگون، از اتصالات چسبی برای اتصال دائمی فلز به کامپوزیت استفاده می‌شود که استحکام مناسبی ندارند. این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از روش عملیات سطحی جدید به نام حکاکی سطح در اتصالات جدید فلز به کامپوزیت معروف به اتصال درگیر، به نام تجاری کاملد، سبب بهبود عملکرد مکانیکی اتصال بین ماده کامپوزیتی و فلزی می‌شود؛ زیرا این نوع اتصال دارای

ظرفیت تحمل بار بیشتری نسبت به اتصالات متداول است. همچنین آزمایشات نشان می‌دهند که این نوع اتصال تا قبل از شکست می‌تواند بیش از دو برابر انرژی ذخیره نماید. ضمن اینکه شکست این نوع اتصال نسبت به اتصالات

رایج بسیار تدریجی‌تر است. با توجه به مزایای اتصال درگیر، این نوع اتصال به تدریج جای خود را در صنعت کامپوزیت، به خصوص در صنایع هوایی کشورهای توسعه‌یافته، باز کرده است.

## ۵. مآخذ

- [1] Hart-Smith, L., "Design of adhesively bonded joints," Elsevier Applied Science Publishers Ltd, *Joining Fibre-Reinforced Plastics*, 1987, pp. 271-311.
- [2] Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*, Langley Research Center Hampton, VA, 1973.
- [3] McMillan, J. "Bonded joints and preparation for bonding," *NATOAGARD Lecture Series*, vol. 102, 1979, p. 7.
- [4] Molitor, P., V. Barron, T. Young, "Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 21, 2001, pp. 129-136.
- [5] Collings, T. "Experimentally determined strength of mechanically fastened joints," Elsevier Applied Science Publishers Ltd, *Joining Fibre-Reinforced Plastics*, 1987, pp. 9-63.
- [6] Tong, L., G.P. Steven, "Analysis and design of structural bonded joints," Univ. of Sydney, New South Wales (AU), 1999.
- [7] Tu, W., P. Wen, P. Hogg, F. Guild. "Optimisation of the protrusion geometry in Comeld™ joints," *Composites Science and Technology*, vol. 71, 2011, pp. 868-876.
- [8] Zhang, H., W. Wen, H. Cui. "Study on the strength prediction model of Comeld composites joints," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, 2012, pp. 3310-3317.
- [9] Parkes, P., R. Butler, J. Meyer, A. de Oliveira, "Static Strength of Metal-Composite Joints with Penetrative Reinforcement." *Composite Structures*, 2014.
- [10] Smith, F., G. Wylde. "Comeld- an innovation in composite to metal joining." *Welding and Cutting*, vol. 4, 2005, p. 182.

## پی‌نوشت

1. Surfi-Sculpt
2. Comeld
3. anisotropy
4. Grit blast

۵. میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت عکس‌برداری از سطوح یا بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد [ویراستار].

6. Vacuum Infusion of Polyester resin
7. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

از تمامی متخصصان و صنعتگران علاقمند به همکاری با مجله علمی ترویجی مهندسی مکانیک دعوت می‌شود تا متون تخصصی و گزارش‌های فنی برآمده از محیط‌های کاری خود را به دبیرخانه مجله مهندسی مکانیک ارسال نمایند. هیئت تحریریه مجله مهندسی مکانیک از این دست‌نوشته‌ها استقبال می‌کند و متون دریافتی را همچون مقاله‌های علمی و گزارش‌های مهندسی در فرایند ارزیابی و داوری قرار می‌دهد. هیئت تحریریه مجله مهندسی مکانیک

