

اثرات ناپیوستگی صفحه‌ای بر استحکام اتصالات چسبی ورق

پویان قابضی^۱، محمدرضا فراهانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در طی سالیان متمادی، پیش‌بینی استحکام اتصالات چسبی مختلف در پژوهش‌های علمی و صنعتی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در اتصالات چسبی وجود عیوب ناپیوستگی یا عدم پیوند در ناحیه همپوشانی، خصوصاً در اتصالات با سطح همپوشانی زیاد، دور از ذهن نمی‌باشد. لذا هدف از این پژوهش بررسی تجربی تأثیر اندازه و شکل عیوب دو بعدی (عدم پیوند) بر استحکام نهایی اتصالات چسبی تک لبه می‌باشد. بدین منظور عیوب دوبعدی با هندسه‌های مربعی، مثلثی و دایروی و با ابعاد ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلیمتر بصورت تجربی در ناحیه همپوشانی اتصال تک لبه نمونه‌های آلومینیومی با استفاده از چسب دو جزئی Araldite 2015 تعبیه شده‌اند. پس از ساخت نمونه‌های معیوب، بر اساس استاندارد ASTM D1002-01 با انجام آزمون کشش محوری، حداکثر نیروی قابل تحمل توسط هر نمونه استخراج شده است. بطور کلی می‌توان گفت که برای عیوب با اندازه ۱۰ میلیمتر، نمونه دارای عیب دایروی، بیشترین قابلیت تحمل نیرو را دارد و به ترتیب نمونه‌های مثلثی و مربعی در جایگاه بعد قرار دارند و برای نمونه‌های با عیوب ۱۵ میلیمتر، بیشترین نیرو به ترتیب توسط نمونه‌های مثلثی، مربعی و دایروی قابل تحمل می‌باشد. برای عیوب با اندازه ۲۰ میلیمتر، نمونه‌های مربعی و دایروی تقریباً نیروی یکسانی تحمل می‌کنند و نمونه مثلثی قابلیت تحمل نیروی کمتری دارد. در انتها، براساس نتایج تجربی، ضرایب اصلاحی جهت پیش‌بینی استحکام نمونه‌های معیوب پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: اتصالات چسبی، تک لبه، ناپیوستگی صفحه‌ای، استحکام اتصال

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.86055.1182	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86055.1182	۱۳۹۷/۰۵/۳۰	۱۳۹۶/۰۴/۳۱	۱۳۹۶/۰۴/۳۱	۱۳۹۶/۰۴/۱۲	۱۳۹۵/۰۲/۲۵
محمدرضا فراهانی					* نویسنده مسئول:	
mrfarahani@ut.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Influence of Planar Discontinuities on the Sheet Adhesive Joint Strength

Pouyan Ghabezi¹, Mohammadreza Farahani^{*2}

1-PhD student, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2-Associate professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Over the years, prediction of adhesive joint strength has attracted much attention in the scientific and industrial research. In this research, the influence of planar discontinuities on the sheet adhesive joint strength was examined. The aim of this study is an investigation of the size and shape effects of the two-dimensional defects on the ultimate strength of adhesive joints. Therefore, defects in two-dimensional geometry, including rectangular, triangular and circular shapes and with dimensions of 5, 10, 15 and 20 mm are made in the overlap zone in the single lap joint using of two-component Araldite 2015 adhesive. The defective samples are based on standard test ASTM D1002-01 and maximum load is achieved. Generally, regarding to defects with a size of 10 mm, the circular samples are most withstand forces and the triangular and rectangular samples are in the next places, respectively. But for samples with defects size 15 mm, samples by triangular, rectangular and circular defects carry out the maximum load, respectively. For defects with a size of 20 mm, the rectangular and circular samples tolerate the same load approximately and the triangular sample has less able to withstand the force. Finally, based on the experimental results, correction coefficients are proposed to predict the strength of defective samples.

ARTICLE INFO

Received: 15/05/2017

Revised: 03/07/2017

Accepted: 22/07/2017

Keywords:

Adhesive joints

Single lap

Planar discontinuities

Joint strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017. 86055.1182

*Corresponding author: Mohammadreza Farahani.

Email address: mrfarahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

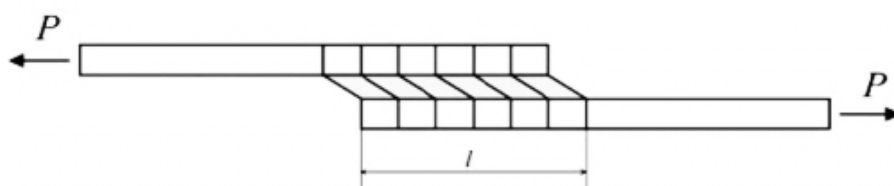
اتصالات مکانیکی معمولی نظیر پیچ، پین و یا پرچ به علت سادگی کار و قابلیت باز کردن، در اتصال مواد به یکدیگر (چه فلزی و چه کامپوزیتی) ارجحیت دارند؛ اما زمانی که اتصال مکانیکی تحت بار قرار می‌گیرد به علت تمرکز تنش، آسیب موضعی در سوراخ پیچ‌ها به وجود می‌آید. این امر سبب شکست ساختاری اتصال و به خطر افتادن یکپارچگی سازه مونتاژ شده می‌گردد. نیاز به طراحی سازه‌های سبک بدون از دست دادن استحکام سبب گردیده است تا بسیاری از محققان و مهندسان در جستجوی شیوه‌های اتصال جایگزینی باشند که حوزه اتصالات چسبی با رشد و توسعه گسترده چسب‌ها در صنایع شیمیایی به بلوغ خود رسیده است.

اتصال چسبی به دلایل زیر در مقایسه با دیگر شیوه‌های اتصال معمولی مطلوب است: (۱) اغلب می‌توان مواد نازک‌تری را به کار برد که سبب کاهش وزن و هزینه می‌گردد. (۲) تعداد قطعات تولیدی را می‌توان کاهش داد (حذف پیچ و مهره و ...) درحالی‌که طراحی آن بسیار ساده‌تر است. (۳) نیاز به فرزکاری، ماشین‌کاری و عملیات شکل‌دهی قطعات کاهش می‌یابد. (۴) اتصالات در قطعات با سطوح بزرگ را می‌توان با نیروی کار کمتر و بدون نیاز به تخصص زیاد ایجاد نمود. (۵) اتصال چسبی نسبت استحکام به وزن بالایی را در حد سه برابر و بیشتر نسبت به اتصالات پرچی به وجود می‌آورد. (۶) صافی سطح و ظاهر آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی بهتری دارند. (۷) در اتصال مواد ناسازگار، به‌عنوان یک درزگیر و یا مانع خوردگی محسوب می‌گردد. (۸) عایق‌کاری الکتریکی و حرارتی عالی دارد. (۹) مقاومت خستگی عالی دارند (اتصالات چسبی عمر خستگی را تا بیست برابر سازه‌های پرچی در نمونه‌های مشابه بالا می‌برند). (۱۰) غالباً چسب به حد کافی انعطاف‌پذیر است تا اجازه تغییر ضرایب انبساط حرارتی هنگام اتصال دو ماده غیرمشابه را بدهد.

استحکام پیوند می‌تواند با انجام عملیات سطحی بر روی چسبنده‌ها به شدت بهبود یابد. شکل‌گیری یک شیمی سطح مناسب، مهم‌ترین مرحله در فرآیند آماده‌سازی سطح می‌باشد زیرا همان‌گونه که توسط دیویس و باند تأکید شده است، یکپارچگی سطح مستقیماً بر روی مداومت پیوند چسبی تأثیر دارد [۱]. برای اولین بار در سال ۱۹۳۸، یک مدل برشی ساده توسط ولکرسون جهت تحلیل اتصالات چسبی همپوشان با این فرض که چسبنده‌ها تحت کشش و چسب تحت برش بوده و هر دو تنش در طول ضخامت ثابت‌اند، ارائه شده است [۲]. اما روش ولکرسون اثرات خمشی چسبنده‌ها و تغییر شکل‌های برشی را که در کامپوزیت‌های با مدول و استحکام عرضی و برشی کم شدید می‌باشد، انعکاس نمی‌دهد. گولاند و ریسنر [۳] این مطالعه را با در نظر گرفتن اثرات خمش چسبنده‌ها که علاوه بر تنش برشی منجر به تنش پوست کنی در لایه چسب می‌شوند بسط و گسترش دادند. رنتون و وینسون [۴] یک مدل تحلیلی با مراتب بالاتر که شامل برش عرضی چسبنده‌ها و کرنش‌های نرمال برای تحلیل اتصالات چسبی بوده را بسط دادند و دریافتند که ماکزیمم تنش برشی چسب از مرکز به سمت لبه اتصال منتقل شده و مقدار آن در مقایسه با مقدار به دست آمده از روش‌های تحلیلی سنتی کاهش می‌یابد. همچنین یانگ و پانگ [۵] با استفاده از تئوری ورق لمینیت کلاسیک با تغییر شکل برشی مرتبه اول یک مدل تحلیلی ارائه کردند که اتصالات همپوشان تک لبه متقارن و نامتقارن تحت بارگذاری کششی و خمشی را مورد تحلیل قرار می‌دادند. نتایج‌شان با نتایج المان محدود همخوانی بسیار خوبی داشت. داس نوس و همکارانش [۶] مدل فراستیژ [۷] شامل دو چسبنده در طول فصل مشترک را بسط دادند. استفاده از چسبنده منعطف و نرم در انتهای همپوشانی (چسب دما پایین) موجب کاهش تنش پوست کنی می‌شود [۸] که هنگام کار با کامپوزیت‌ها اهمیت زیادی دارد.

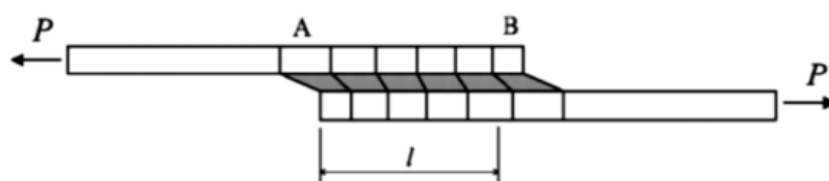
ساده‌ترین تحلیل مربوط به یکی از متداول‌ترین اتصالات کاربردی به نام اتصال همپوشان-واحد (تکی)^۱ می‌باشد که توسط آدامز ارائه شده است [۹]. در این تحلیل، فرض شده است که چسب تنها تحت برش تغییر شکل می‌دهد و چسب صلب و سخت می‌باشند (شکل ۱).

¹single-lap joint



شکل ۱: تغییر شکل در اتصال تک لبه با چسبی صلب [۹].

ولکرسن [۲] از پیشگامان در تجزیه و تحلیل تنش در اتصالات تک لبه تحت کشش، با استفاده از مدل لایه‌ای می‌باشد که در آن فرض شده است که لایه چسبی تنها کرنش برشی را تجربه می‌کند و چسب تنها دستخوش تغییر شکل طولی می‌باشند. تنش کششی در چسب فوقانی در A ماکزیمم می‌باشد (شکل ۲) و در B تا صفر کاهش می‌یابد (لبه آزاد)، بنابراین کرنش می‌بایست به‌طور تصاعدی از A تا B کاهش یابد.



شکل ۲: تغییر شکل‌ها در اتصالات تک لبه با چسبی الاستیک [۲].

تسای و همکارانش [۱۰]، روش‌های تئوری ولکرسن/د-برون و گولاند و ریسنر را به ترتیب برای اتصالات چسبی دو لبه و تک لبه بهبود بخشیدند. این پژوهش بر مبنای توزیع تنش برشی خطی در راستای ضخامت چسب می‌باشد. تسای و همکارانش [۱۰]، مورتسن و تامسن [۱۱]، یانگ و همکارانش [۱۲] و زو و همکارانش [۱۳]، نیز سهمی در تجزیه و تحلیل تئوری اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت دارا می‌باشند.

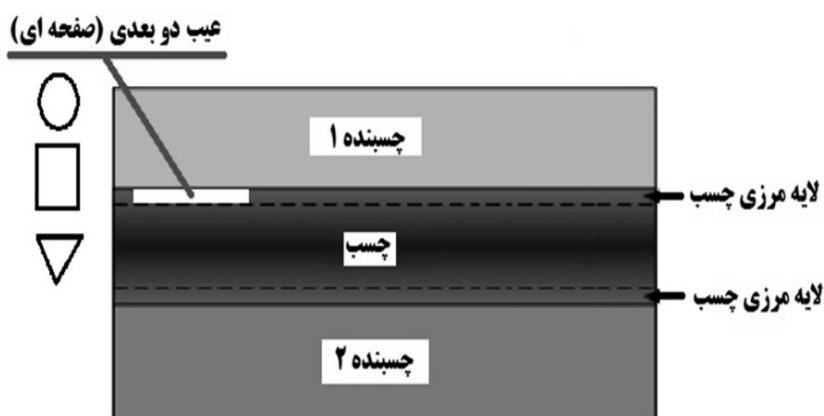
یکی از مشکلاتی که در ساخت اتصالات چسبی به‌ویژه اتصالات با سطوح همپوشانی زیاد ایجاد می‌شود، عدم پیوند و توزیع نامناسب چسب در سطح اتصال می‌شود که می‌تواند ناشی از خطای انسانی و یا کیفیت نامناسب سطح باشد. این عدم پیوند می‌تواند بصورت دو بعدی (صفحه‌ای) و سه بعدی (حجمی و در راستای ضخامت) باشد که پس از انجام آزمایش‌های غیرمخرب می‌توان آنها را مشاهده کرد. امکان پیش‌بینی استحکام اتصال و تأثیر اینگونه عیوب بر میزان افت آن امری ضروری می‌باشد لذا هدف از این پژوهش بررسی تجربی تأثیر اندازه و شکل عیوب دو بعدی موجود در اتصالات چسبی بر میزان استحکام نهایی آنها می‌باشد که با توجه به منابع مورد بررسی تاکنون پژوهشی در این خصوص انجام نشده است. گرابوواک و همکارانش [۱۴]، کاربردی واقعی برای تعمیر وصله‌ای در ابرسازه‌های آلومینیومی را با استفاده از رزین وینیل استر اصلاح شده به‌عنوان چسب ارائه کردند. این تعمیر نتایج چشمگیری را حتی پس از ۱۵ سال استفاده از خود نشان داده است. اهمیت اتصالات نواری دوپل یا تکی در این است که به‌صورت مدل‌هایی در بررسی و تحلیل تعمیرات وصله‌ای، عملی هستند.

یک زمینه تحقیقاتی رو به گسترش، جوشکاری فلزات به پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف می‌باشد. بدین منظور یک شیوه نوین جهت تولید اتصالات دوگانه (هیبریدی) برای اجزای چند ماده‌ای (تشکیل شده از چند نوع ماده) با استفاده از فناوری جوش فراصوتی توسط بیل [۱۵] برای اتصال دادن صفحه نازکی از آلیاژ AL به CFRP مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پس از جوشکاری، الیاف کربن به‌طور کامل توسط آلیاژ آلومینیوم احاطه می‌گردد که این آلیاژ در تماس بین مولکولی و قفل شدگی مکانیکی با آن خواهد بود؛ اما پیچیدگی این فرآیند و نیز این حقیقت که تاکنون بستریهایی با ضخامت ۳ میلی‌متر قابلیت اتصال داشته‌اند یکی از مهم‌ترین معایب آن می‌باشد. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار برای ارتقای عملکرد تعمیرات وصله‌ای کامپوزیتی در ساختارهای فلزی توسط خلیلی [۱۶]، مورد بررسی قرار گرفته است. سیم‌های NiTi میان لایه‌های کولار/پوکسی خوابانده شده که در صفحات شیاردار و بدون شیار جایگذاری شده‌اند.

بارگذاری کششی، خمشی و ضربه‌ای بر روی پیکربندی‌های مختلف اتصال صورت گرفته است. این نتایج اثر مفید آلیاژ حافظه‌دار را در عملکرد اتصال به اثبات رسانیده است.

هدف از انجام این کار تجربی ارائه نمودارهای تجربی میزان تغییر استحکام با توجه به رشد اندازه عیوب و بیان ضرابی تجربی می‌باشد که ضمن ارائه دیدی کلی نسبت به قابلیت اطمینان در اتصالات معیوب امکان پیش‌بینی استحکام در اتصالات تک لبه را فراهم می‌آورد. در شکل ۳ عیوب مورد بررسی بصورت شماتیک نشان داده شده است. به منظور سهولت در مقایسه تأثیر انواع عیوب مختلف سعی شده است از عیوبی با اندازه یکسان استفاده شود بطوریکه قطر عیوب دایروی معادل اضلاع عیوب مثلثی و مربعی می‌باشد.

از دستاوردهای این پژوهش می‌توان در تخمین عمر سازه‌های مختلف که در آنها جهت ایجاد اتصال از چسب استفاده شده است، بهره برد. مانند سازه‌های هوایی که دلیل کاهش وزن سازه بکارگیری چسب در حال افزایش می‌باشد. همانطور که گفته شد وجود عیب عدم پیوند که می‌تواند ناشی از توزیع نامناسب چسب در ناحیه اتصال باشد، باعث کاهش عمر و استحکام سازه شود که با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان استحکام و عمر اتصال را تا حد خوبی پیش‌بینی کرد و برنامه‌ریزی مناسبی جهت تعمیر اتصال (در صورت نیاز) داشت. بدنه هلی‌کوپتر، بدنه خودروها، اتصال قطعات و لوله‌های کامپوزیتی و ... نیز از جمله صنایعی هستند که می‌توانند از نتایج این پژوهش استفاده کنند.



شکل ۳: عیوب دوبعدی که باعث عدم پیوند می‌شوند.

۲- کار تجربی

۲-۱- مواد

در این پژوهش جهت ایجاد اتصال چسبی تک لبه از چسب Araldite 2015 با پایه اپوکسی و از ورق‌های آلومینیومی به ضخامت ۳ میلی‌متر و مطابق استاندارد ASTM D1002-01 به عنوان چسبنده استفاده شده است. ضخامت و طول همپوشانی چسب به ترتیب ۳ و ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است که تمرکز این پژوهش بر بررسی عیوب دوبعدی (de-bonding) بوده و در پژوهشی دیگر به بررسی عیوب سه بعدی (void یا cavity) پرداخته شده است لذا جهت مقایسه نتایج مربوط به عیوب دو بعدی و سه بعدی از چسب با ضخامت ثابت ۳ میلی‌متر استفاده شده است تا امکان ایجاد عیوب سه بعدی میسر شود. در جدول ۱ خواص مکانیکی مربوط به آلومینیوم مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۱: خواص مکانیکی آلومینیوم گرید ۱۱۰۰:

چگالی ($\times 1000 \text{kg/m}^3$)	نسبت پواسون	مدول الاستیک (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)
۲/۷۱	۰/۳۳	۷۵	۱۰۵

همچنین در جدول ۲ خواص مکانیکی مربوط به چسب Araldite 2015 مورد استفاده جهت ایجاد اتصال تک لبه نشان داده شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی چسب Araldite 2015 (براساس اطلاعات کارخانه ای)

مدول الاستیک (MPa)	مدول برشی (MPa)	چگالی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد (g/cm^3)
۱۸۵۰	۷۱۱/۵	۱/۴

۲-۲- ساخت و آزمون

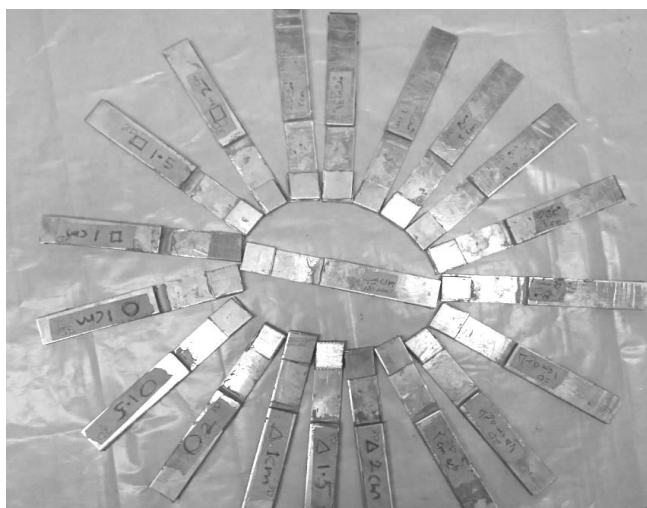
در این پژوهش، جهت ایجاد عیوب مشخصی در اتصالات چسبی تک لبه از ورق‌های PVC^۲ در اشکال و اندازه‌های مختلف جهت ساخت عیوب دو بعدی استفاده شده است (ضخامت ورق PVC، ۰/۱ میلی‌متر می باشد). پس از برش ورق‌های PVC در ابعاد و شکل‌های مورد نظر، جهت اطمینان از عدم اتصال در اطراف آنها و ایجاد عیوب مطلوب، با استفاده از واکس RENLEASE QV 5110 به طور کامل آغشته شده‌اند. پس از ایجاد اتصال چسبی و خشک شدن آن طی زمانی مشخص، نمونه‌های نهایی جهت انجام آزمون کشش محوری آماده شده‌اند (شکل ۴). یکی از پارامترهایی که تأثیر آن بر نتایج می تواند دارای اهمیت باشد، محل عیوب ایجاد در محل اتصال می باشد که با توجه به اندازه عیوب انتخاب شده امکان بررسی اثر آن در این پژوهش وجود نداشت و در پژوهشی جداگانه به این مهم پرداخته خواهد شد.

در جدول ۳ اندازه و شکل عیوب ایجاد شده در نمونه‌ها، نشان داده شده است.

جدول ۳: ابعاد و اشکال مربوط به عیوب ایجاد شده.

ابعاد (mm)	عیوب دو بعدی
۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰	مربعی
۱۰، ۱۵ و ۲۰	مثلثی
۱۰، ۱۵ و ۲۰	دایروی

² Poly vinyl chloride

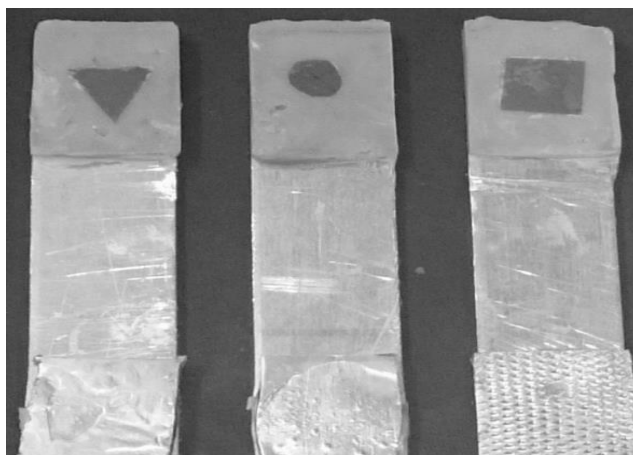


شکل ۴: نمونه‌های ساخته شده.

نمونه‌های ساخته شده جهت بدست آوردن استحکام کششی تحت یک جابجایی کششی استاتیک تک محوره قرار گرفته‌اند، که توسط دستگاه آزمون هیدرولیک WDW-300E با سرعت $0/1$ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده است (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵: دستگاه تست کشش نمونه‌های با اتصال تک لبه.



شکل ۶: نمونه معیوب پس از آزمون کشش (صفحات PVC موجود در نمونه‌ها بوضوح قابل مشاهده می‌باشد).

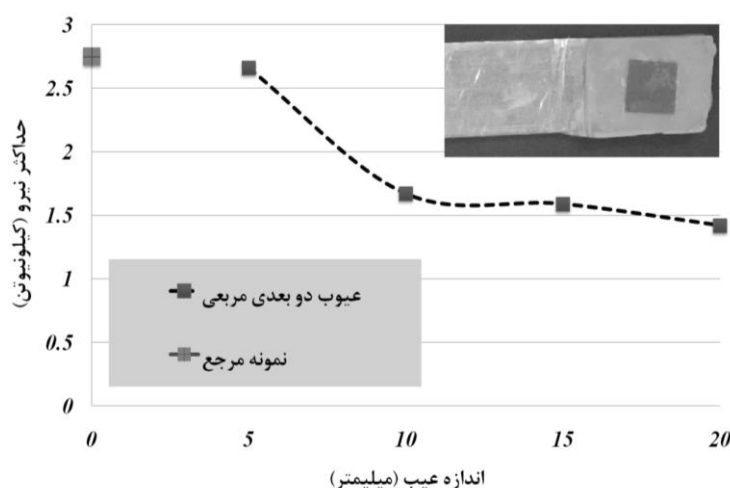
۳- بحث و نتایج

جهت نام گذاری و کدگذاری نمونه‌های ساخته شده از دو بخش استفاده شده است: بخش اول بیانگر شکل عیوب می‌باشد که بترتیب REC، TRI و CIR معرف عیوب مربعی، مثلثی و دایروی می‌باشند. بخش دوم بیانگر اندازه عیوب بر حسب سانتیمتر می‌باشد. برای نمونه مرجع از عبارت REF استفاده شده است.

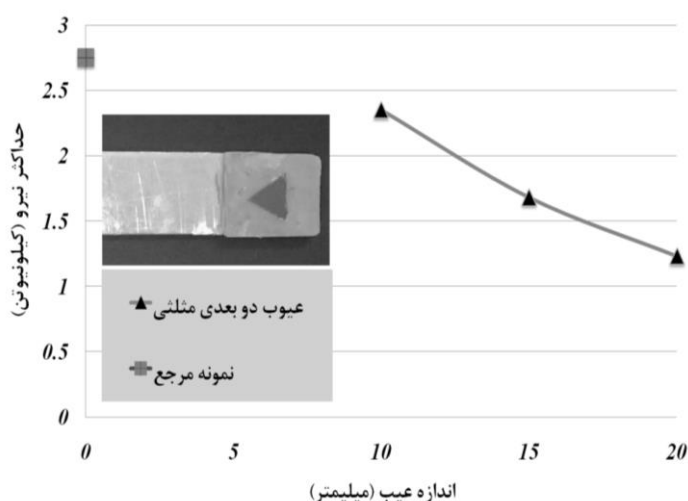
در این بخش نتایج تجربی مربوط به حداکثر نیروی شکست مربوط به نمونه‌های با عیوب مربعی، مثلثی و دایروی ارائه شده است. اندازه عیوب نشانگر اندازه اضلاع نمونه‌های مربعی و مثلثی و قطر نمونه دایروی در نظر گرفته شده است. گسیختگی در اتصالات در واقع ناشی از تنش برشی در اتصال و تنش پوست کنی می‌باشد و از آنجاییکه هدف از این پژوهش یافتن نیروی قابل تحمل توسط اتصال بدون عیب و افزودن ضرایب اصلاحی به نمونه‌های معیوب می‌باشد لذا معیار سنجش قابلیت تحمل هر اتصال، نیروی قابل تحمل محوری می‌باشد.

نتایج تجربی و نیروی بدست آمده برای هر نمونه، میانگین حاصل از تست سه نمونه یکسان می‌باشد. شکل ۷ نتایج تجربی مربوط به نمونه‌های با عیوب مربعی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل زیر می‌توان دریافت که با بزرگتر شدن اندازه عیوب، میزان استحکام نهایی کاهش می‌یابد.

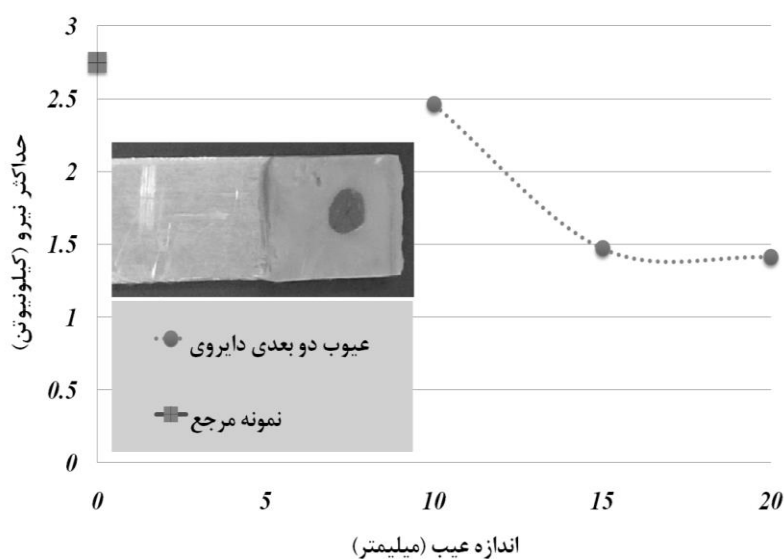
با تغییر اندازه عیب مربعی از ۵ میلیمتر به ۱۰ میلیمتر، استحکام نهایی بترتیب ۲/۶۶ و ۱/۶۷ کیلونیوتن خواهد بود در حالیکه برای نمونه‌های ۱۵ و ۲۰ میلیمتری این میزان بترتیب ۱/۵۹ و ۱/۴۱ کیلونیوتن می‌باشد و بتدریج شیب تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌های معیوب کاهش می‌یابد (استحکام نهایی در نمونه بدون عیب برابر با ۲/۷۵ کیلونیوتن می‌باشد).



شکل ۷: نتایج تجربی مربوط به نمونه‌های با عیوب مربعی



شکل ۸: نتایج تجربی مربوط به نمونه‌های با عیوب مثلثی

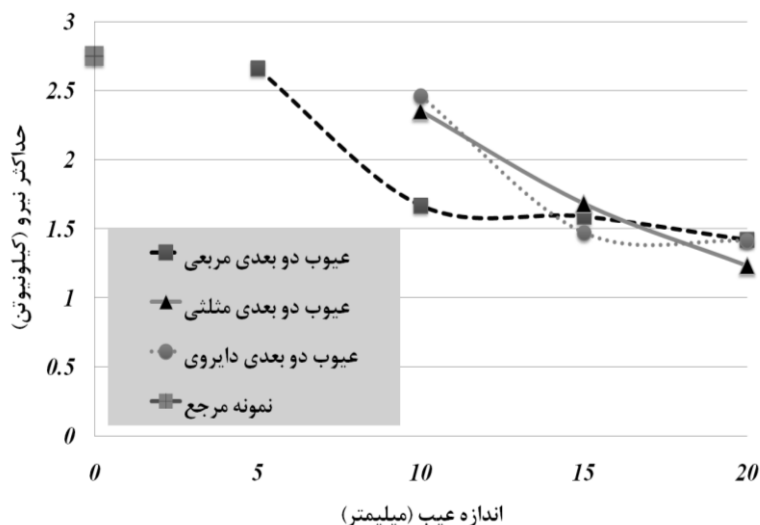


شکل ۹: نتایج تجربی مربوط به نمونه‌های با عیوب دایروی

با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که برای نمونه‌های با عیوب مثلثی بر خلاف نمونه‌های مربعی، شیب تغییرات تقریباً ثابت است. بطوریکه برای نمونه‌های با عیوب ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر، حداکثر نیروی مورد نیاز جهت شکست اتصالات چسبی معیوب دارای ناپیوستگی مثلثی شکل به ترتیب برابر با ۲/۳۵، ۱/۶۸ و ۱/۲۳ کیلو نیوتن می‌باشد. در حالیکه برای نمونه‌های ساخته شده با عیوب دایروی شیب تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل رفته رفته کاهش می‌یابد (شکل ۹).

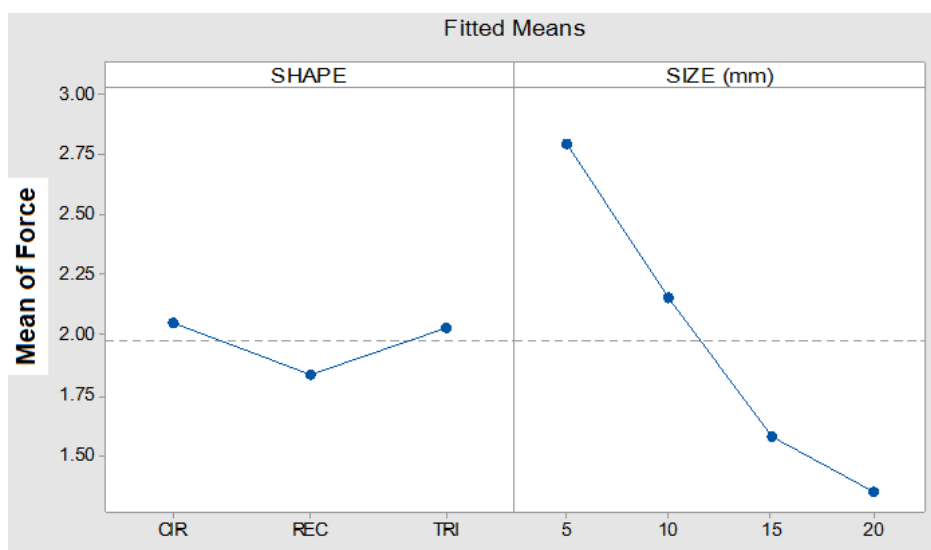
به منظور مقایسه عیوب با اندازه‌های یکسان و هندسه متفاوت، نتایج تجربی حاصل از آزمون تعیین استحکام اتصالات تک لبه، نتایج شکل‌های ۷، ۸ و ۹ بصورت متمرکز در شکل ۱۰ آورده شده است. همان‌گونه که از شکل زیر برمی‌آید، با افزایش اندازه عیوب میزان نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌های مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شود. از شکل زیر می‌توان دریافت که برای عیوب با اندازه ۱۰ میلی‌متر، نمونه دارای عیب دایروی، بیشترین قابلیت تحمل نیرو را دارد و به ترتیب نمونه‌های مثلثی و مربعی در جایگاه بعد قرار دارند و برای نمونه‌های با عیوب ۱۵ میلی‌متر، بیشترین نیرو به ترتیب توسط نمونه‌های مثلثی، مربعی و دایروی قابل تحمل می‌باشد و برای عیوب با اندازه ۲۰ میلی‌متر، نمونه‌های مربعی و دایروی تقریباً نیروی یکسانی تحمل نموده و نمونه مثلثی قابلیت تحمل نیروی کمتری دارد.

با مشاهده محل و نحوه شکست در اتصال چسبی، بطور کلی می‌توان گفت محل بحرانی برای گسیختگی در سمتی است که دارای عیب دو بعدی می‌باشد و با توجه به وجود عیب و در نتیجه سطح تماس کمتر در این سمت از قطعه، نوع شکست بصورت adhesive می‌باشد. لازم به ذکر است نوع گسیختگی در اتصالات چسبی طی سه مکانیزم اتفاق می‌افتد: ۱- adhesive، ۲- cohesive و ۳- substrate.



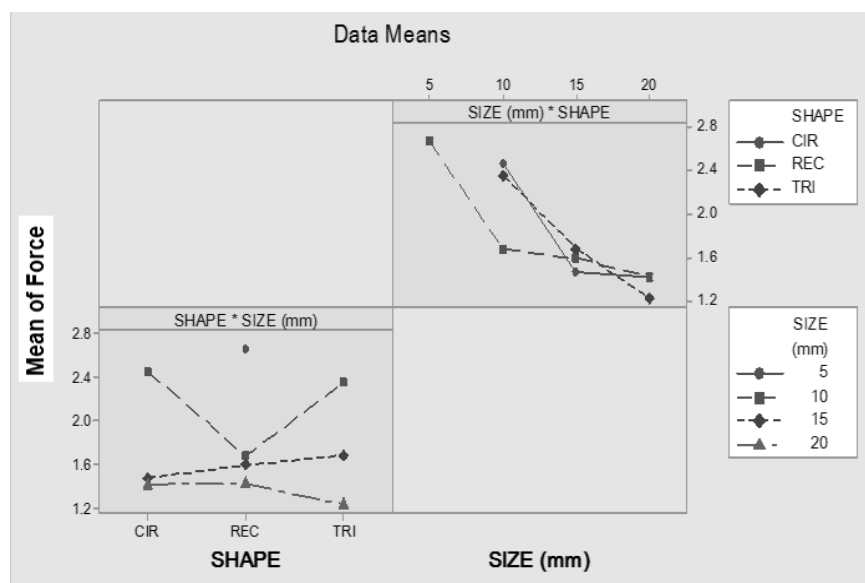
شکل ۱۰: نتایج تجربی مربوط مقایسه نمونه‌های با عیوب مختلف (دو بعدی)

به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج حاصله با استفاده از نرم‌افزار Minitab متوسط استحکام نمونه‌های ساخته شده بر حسب اندازه و شکل عیوب استخراج شده است. با توجه به نتایج تجربی و شکل ۱۱ بطور کلی می‌توان گفت با افزایش اندازه عیوب، نیروی قابل تحمل توسط اتصالات چسبی معیوب کاهش می‌یابد و نمونه‌های دارای عیوب مثلثی و دایره‌ای بطور میانگین قابلیت تحمل نیروی نزدیک به همی دارند و عیوب مربعی بدلیل وجود تعداد بیشتر گوشه‌های نیز و تأثیر آنها بر میزان تمرکز تنش، باعث کاهش بیشتر قابلیت تحمل نیرو در اتصالات می‌شوند.



شکل ۱۱: مقدار میانگین نیروی قابل تحمل در نمونه‌های ساخته شده.

از شکل ۱۲ نیز می توان دریافت که پراکندگی نیروی قابل تحمل در نمونه های دارای عیوب مربعی با اندازه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی متر کمتر از سایر نمونه ها می باشد. همچنین مشاهده می شود که بطور کلی عیوب دارای اندازه ۱۵ میلی متر با توجه به هندسه شان، بیشترین تغییرات را در نیروی قابل تحمل دارند.



شکل ۱۲: تغییرات میانگین استحکام بر حسب شکل و اندازه عیوب.

عیوب موجود در اتصالات چسبی با استفاده از تست های غیرمخرب قابل مشاهده هستند، که این عیوب می توانند در حین ساخت ایجاد شده باشند و یا در حین کار در نمونه های مختلف ایجاد شوند. در ادامه جهت پیش بینی استحکام نهایی در این نمونه های معیوب و بررسی درصد اختلاف میان نیروی قابل تحمل توسط آنها نسبت به نمونه مرجع (بدون عیب)، ضریبی اصلاحی (K_1) پیشنهاد شده است که حاصل تقسیم استحکام نمونه معیوب بر استحکام نمونه مرجع می باشد. بنابراین با استفاده از جدول زیر می توان بدون تخریب یک نمونه دارای عیب، نیروی قابل تحمل توسط آن را تخمین زد.

جدول ۴: ضرایب اصلاحی پیشنهادی (K_1).

شکل عیب	اندازه عیب (میلی متر)	استحکام (KN)	ضریب اصلاحی (K_1)
CIR	۱۰	۲/۴۶	۰/۸۹
CIR	۱۵	۱/۴۷	۰/۵۳
CIR	۲۰	۱/۴۱	۰/۵۱
TRI	۱۰	۲/۳۵	۰/۸۵
TRI	۱۵	۱/۶۸	۰/۶۱
TRI	۲۰	۱/۲۳	۰/۴۴
REC	۵	۲/۶۶	۰/۹۶
REC	۱۰	۱/۶۷	۰/۶
REC	۱۵	۱/۵۹	۰/۵۷
REC	۲۰	۱/۴۲	۰/۵۱

۴- جمع بندی

در این پژوهش اثر اندازه عیوب سه بعدی بر قابلیت تحمل نیرو در اتصالات چسبی تک لبه مورد بررسی قرار گرفته است. بطور کلی می توان گفت که برای عیوب با اندازه ۱۰ میلی متر، نمونه دارای عیب دایروی، بیشترین قابلیت تحمل نیرو را دارد و به ترتیب نمونه های مثلثی و مربعی در جایگاه بعد قرار دارند و برای نمونه های با عیوب ۱۵ میلی متر، بیشترین نیرو به ترتیب توسط نمونه های مثلثی، مربعی و دایروی

قابل تحمل می باشد. برای عیوب با اندازه ۲۰ میلیمتر، نمونه های مربعی و دایروی تقریباً نیروی یکسانی تحمل می کنند و نمونه مثلثی قابلیت تحمل نیروی کمتری دارد. بطور کلی با افزایش اندازه عیوب میزان نیروی قابل تحمل به سمت یک حد مشخص میل می کند. در انتها، براساس نتایج تجربی، ضرایب اصلاحی جهت پیش بینی استحکام نمونه های معیوب پیشنهاد شده است که به وضوح می توان دریافت با افزایش اندازه عیوب شیب تغییرات نیروی قابل تحمل توسط نمونه های با اتصال تک لبه کاهش می یابد.

مراجع

- [1] Davis, M. J. and Bond, D., (1999), Principles and practice of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesive.*, 19(3), 91–105.
- [2] Anyfantis K. N., (2012), *Analysis and Design of Composite to Metal Adhesively Bonded Joints*, PhD thesis, National Technical University of Athens School of Naval Architecture And Marine Engineering.
- [3] Goland, M. and Reissner, E., (1944), The stresses in cemented lap joints. *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics.*, 66(11), A17–A27.
- [4] Renton, W. J. and Vinson, J. R., (1977), Analysis of adhesively bonded joints between panels of composite materials, *Journal of Applied Mechanics*, 44, 101–106.
- [5] Yang, C. and Pang, S. S., (1993), Stress–strain analysis of single-lap composite joints under cylindrical bending, *Composite Engineering*, 3, 1051–1063.
- [6] das Neves, P. J. C., da Silva, L. F. M., and Adams, R. D., (2009), Analysis of mixed adhesive bonded joints part I: theoretical formulation, *Journal of adhesive science and Technology*, 23, 1–34.
- [7] Frostig, Y., Thomsen, O. T., and Mortensen, F., (1999), Analysis of adhesive-bonded joints, square-end, and spew- fillet – high-order theory approach, *Journal of Engineering Mechanics – ASCE*, 125(11), 1298–1307.
- [8] das Neves, P. J. C., da Silva, L. F. M., and Adams, R. D., (2009), Analysis of mixed adhesive bonded joints part II: parametric study, *Journal of adhesive science and Technology*, 23, 35–61.
- [9] Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C., (1997). *Structural adhesive joints in engineering*. London, Chapman & Hall.
- [10] Tsai, M.Y., Oplinger, D.W., Morton, J., (1998). An improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures*, 35, 1163–1185.
- [11] Mortensen, F., Thomsen, O.T., (2002). Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach. *Composite Science and Technology*, 62, 1011–1031.
- [12] Yang, C., Huang, H., Tomblin, J.S., Sun, W., (2004). Elastic–plastic model of adhesive-bonded single-lap composite joints. *Journal of Composite Materials*, 38, 293–309.
- [13] Zou, G.P., Shahin, K., Taheri, F., (2004). An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints. *Composite Structures*, 65, 499–510.
- [14] Grabovac, I., Whittaker, D., (2009). Application of bonded composites in the repair of ships structures - A 15-year service experience. *Composites Part A*, 40, 1381-1398.
- [15] Balle, F., Wagner, G., Eifler D., (2009). Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites. *Advanced Engineering Materials*, 11, 1-2.
- [16] Khalili, S. M. R., Shiravi, M., Nooramin A.S., (2010). Mechanical behaviour of notched plate repaired with polymer composite and smart patches – experimental study. *Journal of reinforced plastics and composites*, 29, 3021.