



بررسی اثر تعداد و قطر سیم بر استحکام اتصالات چسبی تقویت شده در کامپوزیت‌ها

محمد رضا کاجی¹، محمدرضا فراهانی^{2*}، مهدی انصاری³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 1439957131، mrfarahani@ut.ac.ir

کلیدواژگان

اتصال چسبی
سیم‌های تقویتی
آزمایش تجربی
حل عددی

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در ساخت سازه‌های کامپوزیتی توانایی اتصال و مونتاژ آن‌ها است. طراحی و ساخت اتصالات با استحکام مناسب در این سازه‌ها بسیار ضروری می‌باشد. از روش‌های استحکام‌بخشی اتصالات کامپوزیت‌ها می‌توان به استفاده از المان‌های تقویتی در محل اتصال کامپوزیت‌ها اشاره نمود. در این مقاله از المان تقویتی چسب به منظور اتصال دو قطعه کامپوزیتی استفاده شده است. استفاده از المان‌های چسبی سبب یکنواختی توزیع تنش و در نتیجه بهبود استحکام و چقرمگی اتصال می‌شود. در این مقاله به منظور ارتقاء استحکام اتصال چسبی از سیم‌های تقویتی در زمینه چسب استفاده شده است. پارامترهای تأثیرگذار تعداد سیم، قطر سیم و جنس سیم بر استحکام‌بخشی اتصال بررسی شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای مذکور آزمایش‌های تجربی طراحی شده و نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود مقایسه و تحلیل گردید. نتایج حاصل نشان داد استفاده از 20 سیم به عنوان المان تقویتی در چسب آرال دیت 2015 می‌تواند 32 تا 90 درصد سبب بهبود استحکام شود. همچنین افزایش تعداد سیم، قطر سیم و مدول یانگ سیم می‌تواند استحکام اتصال را افزایش دهد که این مساله به تفصیل در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

Investigation on the effects of the number and diameter of the wires on the strength of the reinforced adhesive joint of composites

Mohammadreza Kaji¹, Mohammadreza Farahani^{1*}, Mahdi Ansari²

1- Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Ph.D, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Moddares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

Keywords

Adhesive joint
Reinforcing wires
Experimental test
Numerical solution

Abstract

One of the most important issues in the manufacturing of composite structures is the ability to connect and assemble them. Design and manufacturing of connections with the appropriate strength is essential. One of the strengthening methods of composite connection is the employment of reinforcing elements in the adhesive layer. The use of additional elements in the adhesive layer leads to uniform stress distribution and consequently improves the joint strength and toughness. In this paper, the idea of using metal wire for enhancing the adhesive joints was developed for the first time. Parameters such as the number of wires, wire diameter and mechanical property of wire were considered as the influencing parameters on the joint strength. Experimental tests were designed in order to evaluate the effect of these parameters and the obtained results were described with the finite element outcomes. It was observed that the joint strength improved more than 90% using 20 wires as reinforcing elements in Araldite 2015 adhesive. It was also found that increasing the number of wires, wire diameter and wire stiffness led to the more uniform stress distribution and increased the joint strength.

1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در ساخت کامپوزیت‌ها، توانایی اتصال و مونتاژ آن‌ها است. با رشد روزافزون مواد کامپوزیتی روش‌های اتصال آن‌ها نیز از روش‌های سنتی موجود مانند پیچ و پرچ به سمت استفاده از روش‌های مبتنی بر چسب

در حال تغییر است. تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی تحلیلی، عددی و تجربی برای استانداردسازی و بهبود عملکرد سیستم‌های چسبی صورت پذیرفته است. اولین تلاش‌های تئوری برای طراحی اتصالات توسط ولکرسون و دی برین در سال 1938 صورت گرفت که در

Please cite this article using:

M. Kaji, M. Farahani, M. Ansari, Investigation on the effects of the number and diameter of the wires on the strength of the reinforced adhesive joint of composites, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 28-35, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کوپینگ سو و همکارانش به مطالعه رفتار خستگی و رشد ترک و کسری از زمان خستگی که ترک ایجاد و منجر به شکست می‌شود، در اتصالات کامپوزیت‌ها پرداختند. آن‌ها دریافتند که کسری از عمر خستگی که می‌گذرد تا ترک ایجاد شود در رنج 20% و حداکثر تا 70% عمر قطعه هست که به طول اتصالات قطعات و میزان تنش‌ها بستگی دارد [6]. خلیلی و همکارانش به مطالعه تجربی تأثیر افزودن المان‌های تقویتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تک‌لبه پلیمری پرداختند. آن‌ها از الیاف شیشه، خرده‌های کوچک شیشه و پودر میکرو شیشه با درصد حجمی متفاوت به‌عنوان المان تقویتی در محل اتصال بین دو کامپوزیت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از المان‌های تقویتی شیشه سبب بهبود خواص مکانیکی گردیده بود. استفاده از المان تقویتی پودر میکرو شیشه تا 30% کسر حجمی اتصال بهترین نتیجه را به همراه داشت. در این وضعیت عمر خستگی 125% افزایش داشته، استحکام نهایی کششی اتصال 72% بهبود یافته، استحکام نهایی خمشی 112% بهبود یافته و مقاومت به ضربه تا 63% افزایش یافته بود [7].

سیروستاو در سال 2011 به مطالعه تجربی اثر نانو تیوب‌های کربنی بر استحکام چسبی اتصال تک‌لبه C/C و C/C-SiC کامپوزیت پایه سرامیکی پرداخت. وی در رزین اپوکسی 3% از ذرات نانو تیوب کربنی استفاده کرد و استحکام اتصال را از متوسط 8 مگا پاسکال به 10 مگا پاسکال در حالت اپوکسی بدون نانو تیوب‌های کربنی و اپوکسی باوجود ذرات نانو تیوب کربنی افزایش داد. همچنین نشان داده شد که ذرات نانو تیوب کربنی از آغاز ترک و رشد ترک در چسب اپوکسی مقاومت می‌کنند [8]. بتن بیلیرجی و همکارانش در سال 2011 به مطالعه تجربی و عددی کامپوزیت‌های تک‌لبه تقویت شده با جایگذاری الیاف در چسب پرداختند. آن‌ها در لبه اتصال در چهار قسمت الیاف شیشه را به‌صورت Z پین جایگذاری نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داده که استحکام نهایی و شکست به ترتیب 80% و 60% بهبود یافته و نسبت به روش Z پین در حالت استاتیکی پایداری بیشتری حاصل شد [9].

پارکر و بوتلر در سال 2014 از المان‌های تقویتی نفوذی پینی شکل در محل اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که وجود پین‌ها در

آن به تهیه درک اولیه از تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در اتصال‌دهنده و قطعات اتصالی تک‌لبه و دولبه پرداخته شد. آن‌ها اتصال چسبی یک‌لبه لایه چسب را به‌صورت فنرها پیوسته برشی مدل‌سازی نمودند. در این مدل از اثر گشتاور خمشی ایجاد شده به علت غیر هم‌مرکز بودن مسیر بار صرف‌نظر شده است، این اثر برای چسبنده‌های¹ کامپوزیتی با استحکام و مدول برشی و عرضی کم بسیار مهم هستند [1].

کلیک و دلاویز به مطالعه و بررسی خواص مکانیکی بر اثر افزودن ذرات فلزی آلومینیوم و مس در محل اتصال دو کامپوزیت پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که با افزودن ذرات فلزی، استحکام کششی اتصال کاهش یافته ولی استحکام برشی تا میزان 0/84 درصد حجمی افزودن المان تقویتی به‌طور چشم‌گیر افزایش داشته و با افزایش میزان حجمی المان‌های تقویتی استحکام برشی کاهش یافته است [2].

جانسون و همکارانش به استفاده از ذرات پلاستیکی در ضمن چسب اپوکسی برای بهبود چقرمگی اتصال پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن ذرات پلاستیکی به اپوکسی علاوه بر افزایش چقرمگی، رشد ترک نیز کاهش می‌یابد [3]. مین یو و همکارانش در سال 2003 به استفاده از فلز به‌عنوان المان تقویتی در قسمت فیلت اتصال تک‌لبه تحت تنش کششی پرداختند. آن‌ها از سیم فلزی با ضخامت 0/8 میلی‌متری و 1/2 میلی‌متری و میله فلزی با سطح مقطع مثلثی و دایره‌ای در قسمت فیلت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سیم جایگذاری شده با ضخامت 1/2 در فیلت استحکام برشی را تا 45% افزایش داده و سبب تغییر مود شکست می‌شود [4].

آمریچ و همکارانش در سال 2005 به تحلیل رفتار شکست کامپوزیت تک‌لبه تقویت‌شده با المان تقویتی Z سیم (لبه‌های کامپوزیت دوخته‌شده) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شکست در حالت استاتیکی و خستگی در کامپوزیت‌های متصله و ناشی از جدایش لایه‌ها² خواهد بود. رشد ترک در حالت خستگی پایدار و در حالت استاتیکی ناپایدار است. همچنین بخیه‌زنی سبب بهبود 40% استحکام کششی نهایی شده و در جلوگیری از سرعت رشد ترک تحت بارگذاری خستگی بسیار مؤثر است [5].

¹ Adherents² Delamination



Fig. 1 Standard tensile test samples

شکل 1 تصویر نمونه های استاندارد آزمایش کشش

جدول 1 خواص چسب آرالدیت 2015 [11]

Table 1 Properties of Araldite 2015 adhesive [11].

مقدار	ویژگی
1/85 ±0/21	مدول یانگ E (GPa)
0/33	ضریب پواسون ν
12/63	استحکام کششی تسلیم σ_y (GPa)
21/63	استحکام کشش شکست σ_f (GPa)
4/77	کرنش کششی شکست σ_f (%) [%]
0/56	مدول برشی G (GPa)
14/6	استحکام برشی تسلیم τ_y (MPa)
17/9	استحکام برشی شکست τ_f (MPa)
43/9	کرنش برشی شکست γ_f (%)
0/43	چقرمگی در کشش G_n^c (N/mm)
4/70	چقرمگی در برش G_s^c (N/mm)

پس از آماده‌سازی سطوح ابتدا لایه نازکی از چسب بر روی محل اتصال قرار داده و با توجه به طراحی آزمایش تعداد سیم مناسب بر روی چسب جایگذاری گردیده و سپس لایه نازکی دیگر از چسب بر روی سیم‌ها قرار داده شد. باید توجه داشت که با توجه به استاندارد ضخامت چسب نباید بیش از 0/75 میلی‌متر باشد لذا از یک فیکسچر ساده برای کنترل ضخامت و ایجاد فشار یکنواخت بر روی اتصال استفاده شد. نمونه‌ها باید در دمای محیط به مدت 48 ساعت برای اطمینان از پخت کامل نگهداری شوند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و آماده‌سازی لبه‌های انتهایی، نمونه‌ها بر اساس استاندارد مورد آزمایش کشش قرار گرفتند.

استاندارد D5573-99 در ارتباط با طبقه‌بندی مدهای شکست اتصالات چسبی است. مدهای شکست مشخص شده در این استاندارد عبارتند از: (1) شکست از چسب، (2) شکست درون چسبی، (3) شکست لایه‌نازک چسب²، (4) شکست پارگی الیاف³، (5) شکست پارگی الیاف به‌طور سبک⁴، (6) شکست از سطح مقطع عضو اتصال⁵ و (7)

محل اتصال سبب تأخیر در رشد ترک و کند کردن رشد ترک‌ها می‌شود. همچنین این روش سبب بهبود استحکام نهایی به میزان 6/5 برابر بیشتر نسبت به زمانی که بین موجود نباشد شده است و همچنین توانایی جذب انرژی 80 برابر بیشتر شده است [10].

در این مقاله اثر استفاده از المان‌های تقویتی سیم در بیشینه نیروی تحمل شده اتصال، تنش برشی و تنش پیل در اتصالات چسبی کامپوزیت‌ها بررسی شد. تعداد سیم، قطر سیم و جنس سیم به عنوان پارامترهای مؤثر و با هدف افزایش استحکام اتصال به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

2- بررسی‌های تجربی

برای بررسی اثر استفاده از المان‌های تقویتی سیم در اتصالات چسبی تک‌لبه، تعدادی اتصال تک‌لبه ساخته شد. نمونه‌ها کامپوزیت از جنس اپوکسی شیشه با چگالی 200 گرم بر مترمربع به طول 100 میلی‌متر و عرض 25 میلی‌متر و با ضخامت 5 میلی‌متر به روش لایه‌گذاری دستی¹ بر اساس استاندارد D5868 ساخته شد. شکل 1 تصویر نمونه‌های استاندارد کشش را نشان می‌دهد. چسب آرالدیت 2015، چسبی دوجزئی با چقرمگی بالا است که برای اتصال کامپوزیت‌ها بسیار مناسب است. این چسب در برابر خوردگی و حرارت بسیار مقاوم بوده و توانایی تحمل تنش‌های پیل و برشی بالا را دارا است. این چسب برای اتصال دو کامپوزیت انتخاب گردیده شد. خواص این چسب مطابق با تست‌های استاندارد انجام شده در جدول 1 نشان داده شده است [11].

برای بررسی اثر استفاده از سیم نمونه‌های دارای تعداد 5، 10 و 20 سیم از جنس فولاد ساده کربنی با مدول یانگ 200 گیگا پاسکال ساخته شد. برای اینکه سطوح چسبیده‌ها و چسب، به‌طور مناسب متصل شوند و مود شکست چسبندگی زودرس وجود نداشته باشد، با استفاده از صفحه سنباده سطوح محل اتصال زبر می‌شوند. سنباده زنی در چند مرحله انجام می‌شود و پس از این مرحله، سطوح با استفاده از استون تمیزکاری شده و پس از خشک شدن آماده اعمال چسب هستند. سیم‌ها نیز همانند سطوح کامپوزیتی چند مرحله سنباده‌زنی شده و سپس با استون شسته می‌شوند.

² Thin-layer cohesive failure

³ Fiber-tear failure

⁴ Light-fiber-tear-failure

⁵ Stock-break failure

¹ Hand lay up

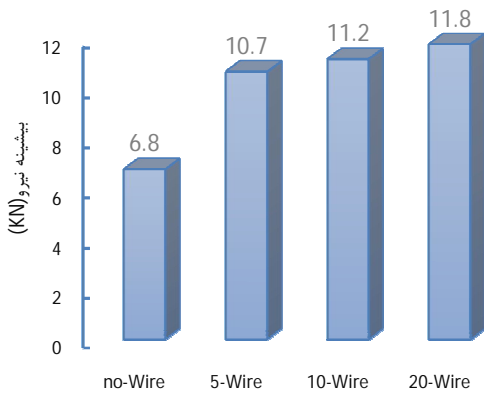


Fig. 3 Maximum load of the specimens under tension test

شکل 3 حداکثر نیرو پیش از شکست نمونه‌های تحت آزمایش کشش

3- شبیه‌سازی المان محدود

برای شبیه‌سازی اتصال چسبی در نرم‌افزارهای المان محدود می‌توان از دو رویکرد کلی بهره برد، رویکرد مکانیک آسیب و رویکرد مکانیک پیوسته. با استفاده از رویکرد مکانیک آسیب امکان ایجاد و رشد ترک و نهایتاً انحطاط در ناحیه تغییر شکل پلاستیک در نمونه وجود دارد که بخصوص برای چسب‌های انعطاف‌پذیر نتایج دقیق‌تری را به همراه خواهد داشت. در رویکرد مکانیک پیوسته از ماکزیمم میزان تنش پیش‌بینی‌شده توسط المان محدود، برای پیش‌بینی شکست استفاده می‌شود و دیگر تنش‌های اصلی مؤثر در شکست را در نظر نمی‌گیرد. در رویکرد مکانیک پیوسته امکان ایجاد و رشد آسیب وجود ندارد. به دلیل نیاز به امکان جایگذاری المان تقویتی سیم در بین چسب از رویکرد مکانیک پیوسته استفاده شد. لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت‌های موجود در زمینه استفاده از المان‌های چسبی، امکان مدل‌سازی چسب تقویت‌شده و تحلیل آن با رویکرد مکانیک آسیب امکان‌پذیر نمی‌باشد و این در حالی است که مدل محیط پیوسته علی‌رغم سادگی می‌تواند نتایج قابل قبولی در این خصوص ارائه نماید. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس 6-13 استفاده شد.

مدل‌ها به صورت سه‌بعدی شکل‌پذیر¹ به صورت جامد² ایجاد شد. برای شبیه‌سازی چسب با استفاده از رویکرد مکانیک محیط‌های پیوسته، چسب به صورت ایزوتروپیک³ با مدول الاستیک $E=20e9$ و ضریب پواسون $\nu=0/4$ در نظر

شکست ترکیبی (شکل 2). شکست نمونه تحت آزمایش به‌ندرت تنها محدود به یک مد شکست خواهد بود و غالباً ترکیبی از مدها باعث شکست می‌شود.

استفاده از سیم به‌عنوان المان تقویتی سبب توزیع یکنواخت‌تر تنش پیل و تنش برشی می‌شود. در صورتی که از سیم در ضمن اتصال استفاده شود مد غالب شکست تغییر می‌کند. مد شکست غالب باوجود سیم، شکست درون چسبی است. با افزایش تعداد سیم سهم مد شکست درون چسبی بیشتر می‌شود و از آنجا که شکست درون چسبی نیازمند نیروی بیشتری نسبت به شکست چسب است، لذا با افزایش تعداد سیم استحکام بیشتر می‌شود. همچنین افزایش تعداد سیم مشارکت المان‌های تقویتی در انتقال بار را نیز افزایش داده و سهم چسب در انتقال بار کاهش می‌یابد.

برای بررسی اثر سیم به‌عنوان المان تقویتی اتصال دارای 5، 10 و 20 سیم فولاد ساده کربنی با قطر 0/2 میلی‌متر با چسب آرالدیت 2015 مورد آزمایش قرار گرفت. استحکام کششی نهایی سیم 430 N/mm^2 و استحکام تسلیم آن 360 N/mm^2 می‌باشد. حداکثر نیروی قابل تحمل برای نمونه‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است افزایش تعداد سیم حداکثر بار پیش از شکست را افزایش می‌دهد. با استفاده از 20 سیم می‌توان استحکام را 90/32% نسبت به نمونه بدون سیم افزایش داد. به‌علاوه حداکثر جابجایی پیش از شکست نیز در این نمونه‌ها تا حدود زیادی افزایش پیدا کرده است. البته شایان‌ذکر است افزایش جابجایی پیش از شکست بیشتر ناشی از افزایش تغییر شکل کامپوزیت‌ها به دلیل افزایش نیرو قابل تحمل اتصال است.

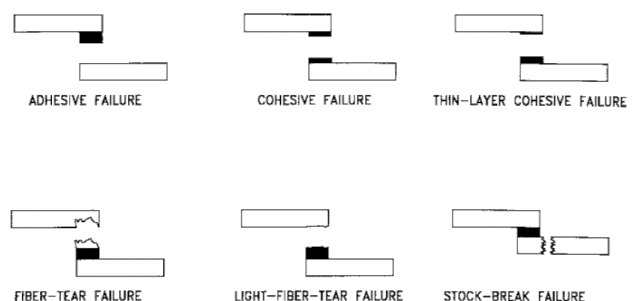


Fig. 2 Schematic views of common failure modes of adhesive joints [12]

شکل 2 شماتیک حالت‌های رایج شکست اتصالات چسبی [12]

¹ Deformable
² solid
³ Isotropic

به دلیل استحکام و ضخامت بالای عضوهای اتصال و چسب، تنش‌ها در ناحیه الاستیک خواهد بود. شرایط مرزی دقیقاً مطابق آنچه در دستگاه آزمایش کشش اعمال می‌شود، لحاظ شده است، لذا کلیه درجات آزادی جابجایی یک انتها گرفته شده و سر دیگر تنها می‌تواند در یک جهت حرکت داشته باشد.

به دلیل تمرکز تنش در گوشه‌های اتصال، میزان تنش به شدت به اندازه مش‌ها و چگونگی توزیع آن‌ها در گوشه وابسته است. بنابراین در زمان استفاده از رویکرد مکانیک محیط‌های پیوسته باید به چگونگی مش‌بندی بخصوص در گوشه‌ها توجه نمود [14]. در این رویکرد به دلیل تمرکز تنش در گوشه‌های اتصال میزان تنش به شدت به اندازه مش‌ها و چگونگی توزیع آن‌ها در گوشه و شکل گوشه‌ها وابسته است. لذا از یک فیلت در گوشه اتصال چسبی استفاده شد [14]. در ادامه با بررسی اثر ابعاد مش و انجام آنالیز مش بر روی 5 سایز مختلف مش، نهایتاً با اندازه مش $e^{-4} \cdot 1/23$ ، استقلال نتایج با دقت 3% از ابعاد مش مورد استفاده مشاهده گردید، که به همین دلیل در ادامه در تمامی تحلیل‌ها از همین ابعاد مش استفاده شده است.

3-1- بررسی اثر تعداد سیم

به منظور بررسی اثر تعداد سیم بر افزایش استحکام، نمونه اتصال بدون المان تقویتی با نمونه‌های دارای 5، 10، 15 و 20 سیم شبیه‌سازی و مقایسه گردیده شد. برای این منظور متغیرهای دیگر مانند جنس سیم و قطر ثابت در نظر گرفته شد (سیم فولاد ساده کربنی با قطر 0/2 میلی‌متر) و نمودارهای تنش پیل و تنش برشی بررسی شد. در شکل 5 ماکزیمم تنش پیل برای حالت بدون المان تقویتی و نمونه‌های دارای 5، 10، 15 و 20 سیم مقایسه شده است.

مشاهده شد که با افزایش تعداد سیم‌ها و در نتیجه کاهش فاصله بین المان‌های تقویتی توزیع تنش پیل یکنواخت‌تر می‌گردد. بیشترین غیریکنواختی در نمودار توزیع تنش پیل، در نواحی انتهایی اتصال، جایی که آغازگر شکست اتصال است، دیده شد. با افزایش تعداد سیم‌ها به‌طور محسوس میزان ماکزیمم تنش پیل در نواحی انتهایی کاهش می‌یابد. در اتصال دارای 20 سیم حداکثر تنش پیل به میزان 37/75% نسبت به حالت بدون المان تقویتی کاهش یافته است.

گرفته می‌شود [13]. شکل 4 مش‌بندی و شرایط مرزی نمونه را در نرم‌افزار اجزا محدود نشان می‌دهد.

برای المان‌های تقویتی سیمی خواص فولاد کم‌کربن با مدول الاستیک $E=200e9$ و $\nu=0/3$ در نظر گرفته شد. عضوهای اتصال با استفاده از خواص جدول 2 مدل شدند. این خواص با استفاده از آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های ساخته شده، بدست آمده اند. نمونه‌های مدل شده به‌صورت کامپوزیت به طول 100 میلی‌متر و عرض 25 میلی‌متر و با ضخامت 5 میلی‌متر شبیه‌سازی می‌شوند. ضخامت چسب برابر 0/75 میلی‌متر در نظر گرفته شد. عرض چسبنددها که با عرض چسب برابر است، 25 میلی‌متر قرار داده شد. به‌منظور بررسی اثر استفاده از المان‌های تقویتی سیم در بین چسب، به بررسی اثر وجود سیم در طول اتصال بر نمودار پیل و تنش برشی پرداخته می‌شود. در صورت همگن شدن و کاهش تنش‌های پیل و یا تنش‌های برشی در طول نمونه و گوشه‌های اتصال می‌توان نتیجه گرفت اتصال تا پیش از شروع آسیب توانایی تحمل بارهای بیشتری داشته و در نتیجه سبب بهبود استحکام گردیده است. به منظور مقایسه، نیروی واحد (1 کیلو نیوتن) به انتهای یکی از عضوهای متصله اعمال شد. مشابه این روش تحلیلی پیش از این در مقاله‌ای در سال 2014 مورد استفاده قرار گرفته شده است [13].

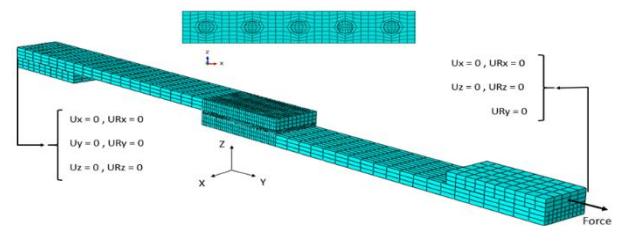


Fig. 4 Mesh and boundary condition of SLJ in FEM software.

شکل 4 مش‌بندی و شرایط مرزی نمونه آزمایش کشش در نرم‌افزار اجزا محدود

جدول 2 خواص به‌کار رفته برای شبیه‌سازی کامپوزیت.

Table 2 The employed peropertieis for composite modeling.

خواص	کامپوزیت شیشه/اپوکسی $200g/m^3$
E_1	12/2 GPa
E_2	11/3 GPa
ν_{12}	0/158
G_{12}	2/3 GPa
$(\sigma_1)_{UTS}$	181MPa
$(\sigma_2)_{UTS}$	172/4 MPa
$(\sigma_{12})_{UTS}$	39/6 MPa

سیم‌ها، حداکثر تنش پیل همواره کاهش پیدا خواهد کرد و در نتیجه استحکام اتصال افزایش خواهد یافت.

تغییرات ماکزیمم تنش برشی به ازای تغییر قطر 10 سیم از جنس فولاد کم‌کربن نیز در شکل 8 نشان داده شده است. با افزایش قطر سیم میزان توزیع تنش برشی در طول اتصال یکنواخت‌تر شده و حداکثر تنش در گوشه‌ها کاهش می‌یابد.

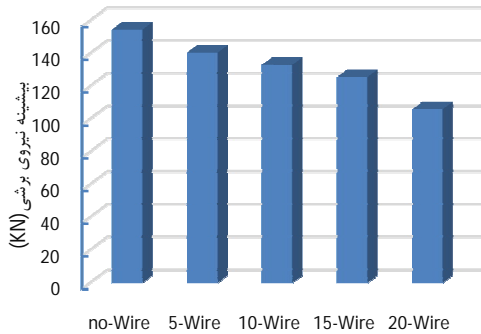


Fig. 6 Maximum shear stress versus number of wires

شکل 6 تغییرات ماکزیمم تنش برشی با تغییر تعداد سیم

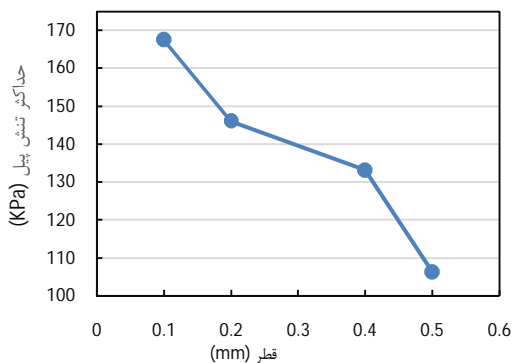


Fig. 7 Maximum peel stress versus wire diameter

شکل 7 تغییرات ماکزیمم تنش پیل به ازای افزایش قطر سیم

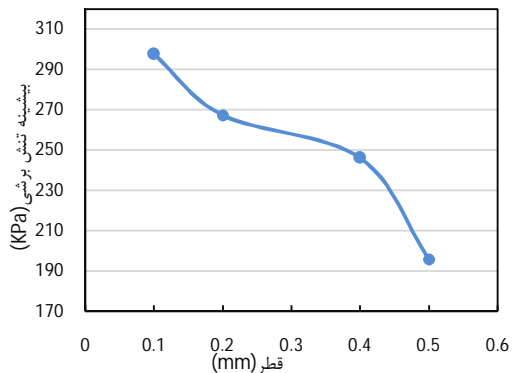


Fig. 8 Maximum shear stress versus wire diameter

شکل 8 تغییرات ماکزیمم تنش برشی به ازای افزایش قطر سیم

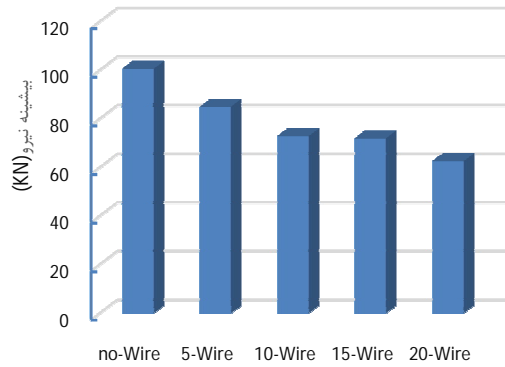


Fig. 5 Maximum peel stress versus number of wires

شکل 5 تغییرات ماکزیمم تنش پیل با تغییر تعداد سیم

علاوه بر تنش پیل، تنش برشی نیز عامل مؤثر در شکست اتصال می‌باشد. حداکثر تنش برشی در اتصالات چسبی در گوشه‌های اتصال است و در صورت کاهش تنش برشی گوشه‌ها، استحکام اتصال به صورت چشم‌گیر افزایش می‌یابد. همانند تنش پیل تأثیر المان تقویتی سیم در توزیع تنش برشی به‌عنوان تنش مؤثر در شکست اتصال، نیز بررسی گردیده شد. نسبت به حالت بدون المان تقویتی سیم، در اتصال دارای 20 سیم میزان حداکثر تنش برشی 31/41% نسبت به حالت بدون المان تقویتی کاهش یافته است. حداکثر تنش برشی نمونه بدون سیم با نمونه‌های دارای 5، 10، 15 و 20 سیم در شکل 6 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است که تأثیر کاهش المان تقویتی بر روی تنش پیل کمی بیش از تنش برشی است، اما به‌رحال تأثیر المان تقویتی بر تنش برشی نیز چشم‌گیر است.

3-2- بررسی اثر قطر سیم

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر استحکام نهایی اتصال دارای المان تقویتی سیمی، قطر سیم است. مشاهدات عددی نشان می‌دهد که افزایش قطر سیم‌ها تأثیر مثبت بر توزیع تنش برشی و تنش پیل خواهد داشت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد با ثابت در نظر گرفتن تعداد 10 سیم فولادی و حذف تأثیر پارامترهای دیگر، استفاده از سیم فولادی با قطر 0/4 میلی‌متر سبب کاهش تنش برشی به میزان 21/32% و تنش پیل به میزان 31/91% نسبت به سیم فولادی با قطر 0/2 میلی‌متر می‌شود. تغییرات حداکثر تنش پیل به ازای تغییر قطر 10 سیم از جنس فولاد کم‌کربن در شکل 7 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بر اساس نتایج شبیه‌سازی با افزایش قطر

با استفاده از سیم با مدول یانگ بالاتر تنش‌های برشی در طول اتصال یکنواخت‌تر و در نتیجه تنش میانگین برشی نیز کاهش می‌یابد.

3- جمع‌بندی نتیجه‌گیری

در این پژوهش ایده استفاده از المان‌های تقویتی سیمی برای استحکام‌بخشی اتصالات چسبی در کامپوزیت‌ها مطرح شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای تعداد سیم، قطر سیم و جنس سیم به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر استحکام‌بخشی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ابتدا با طراحی آزمایش‌های تجربی اثر استفاده از المان‌های تقویتی سیمی شکل بررسی شده و سپس با تحلیل عددی به بررسی صحت نتایج، تحلیل و تعمیم آن‌ها پرداخته شد. خلاصه نتایج به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- در صورت استفاده از سیم به‌عنوان المان تقویتی مد شکست درون چسبی در همه نمونه‌ها به عنوان مد شکست غالب برقرار گردید.

- استفاده از سیم سبب یکنواختی توزیع تنش‌های پیل و برشی در طول اتصال می‌شود، به طوری که با استفاده از 20 سیم تقویتی، 37% کاهش تنش پیل و 31% کاهش تنش برشی مشاهده شد.

- آزمایش‌های تجربی نشان داد که افزایش تعداد سیم‌های تقویتی سبب افزایش استحکام اتصال می‌شود به طوری که در نمونه تقویت شده با 20 سیم، استحکام اتصال بیش از 90% افزایش پیدا کرد. با افزایش تعداد سیم نرخ افزایش استحکام اتصال اندکی کاهش می‌یابد.

- افزایش قطر سیم باعث افزایش تحمل بار توسط المان‌های تقویتی شده و در نتیجه سبب بهبود استحکام می‌شود. با دو برابر کردن قطر سیم، 31% کاهش تنش پیل و 21% کاهش تنش برشی مشاهده شد.

- با استفاده از سیم با مدول یانگ بالاتر توانایی سیم برای تحمل بار بیشتر شده، بزرگی تنش‌ها در اتصال کاهش می‌یابد و در نتیجه استحکام اتصال افزایش خواهد یافت.

4- مراجع

- [1] O. Volkersen, Rivet strength distribution in tensile-stressed rivet joints with cross-section, *Luftfahrtforschung*, Vol. 15, pp. 41-47, 1938.
- [2] D. R. Kilik F., Use Al and Cu as reinforcement particle in composite lap jointe, *International*

با افزایش قطر سیم به دلیل افزایش توانایی سیم برای تحمل بار بیشتر، سهم المان‌های تقویتی برای انتقال بار افزایش‌یافته و تنش‌ها در چسب کاهش می‌یابد و نهایتاً استحکام اتصال افزایش یابد.

3-3- بررسی اثر خواص مکانیکی سیم

با استفاده از سیم با مدول یانگ بالاتر توانایی المان‌های تقویتی برای تحمل بار بیشتر شده و همچنین توزیع تنش‌های پیل و برشی در طول اتصال یکنواخت‌تر شده و میزان متوسط و حداکثر تنش‌های پیل و برشی کاهش می‌یابد. به ازای سیم‌های با مدول یانگ متفاوت حداکثر تنش پیل محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل‌مشاهده است با افزایش مدول یانگ، به‌طور پیوسته، حداکثر تنش پیل کاهش می‌یابد. استفاده از سیم با مدول یانگ بالاتر سبب کاهش پیوسته حداکثر تنش برشی می‌شود (شکل 10). تأثیر استفاده از سیم با مدول یانگ بالاتر در تنش پیل به مراتب بیش از تنش برشی خواهد بود.

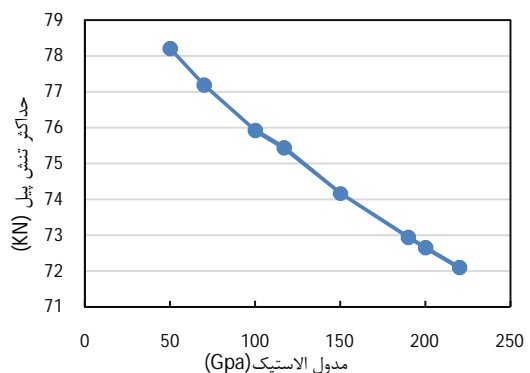


Fig. 9 Maximum peel stress versus young modulus of wires

شکل 9 تغییرات ماکزیمم تنش پیل به ازای تغییر مدول یانگ سیم

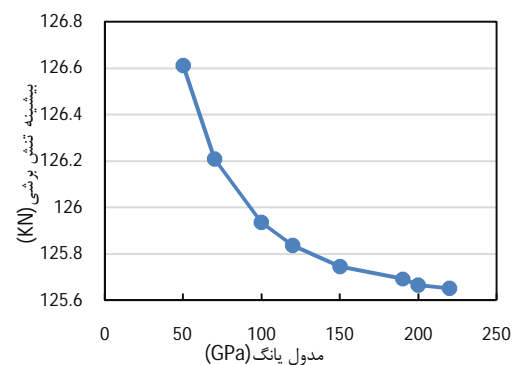


Fig. 10 Maximum shear stress versus young modulus of wires

شکل 10 تغییرات ماکزیمم تنش برشی به ازای تغییر مدول یانگ سیم

- C/C-SiC ceramic fibre composites, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 31, pp. 486-489, 2011.
- [9] Y .C. Bertan Beylergil 1, Alaattin Aktas, Experimental and numerical analysis of single lap composite joints with inter-adherend fibers, *Composites: Part B*, Vol. 1885-1896, 2011.
- [10] R. B. P.N. Parkes, J. Meyer, A. de Oliveira, Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement, *Composite Structures*, Vol. 118, pp. 250-256, 2014.
- [11] R. Campilho, et al., Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 44, pp. 48-56, 2013.
- [12] A. S. f. T. a. M. (ASTM), Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints D 5573-99, 1999.
- [13] S. M. J. R. H. Khoramishad, Metallic fiber-reinforced adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 55, pp. 114-122, 2014.
- [14] L. F. M. da silva, Campilho, RDSG, Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints, *springer*, 2012.
- Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 9, pp. 224-230, 1989.
- [3] T. Jansen B.J.P., Meijer H.E.H., Lemstra P.J., Preparation of thermoset rubbery epoxy particles as novel toughening modifiers for glassy epoxy resins, *polymer*, Vol. 40, pp. 5601-7, 1999.
- [4] Y. Z. Min You, Xiao-Ling Zheng, Wen-Jun Liu, Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23, pp. 365-369, 2003.
- [5] R. O. F. Aymerich, P. Priolo, Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint, *Composites: Part A*, Vol. A36, pp. 603-614, 2005.
- [6] J.-S. Y. Kwang-Soo Kim a, Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods, *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 477-485, 2006.
- [7] A. S. S.M.R. Khalili , S.D. Hoseini, Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 28, pp. 436-444, 2008.
- [8] V. K. Srivastava, Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and