



مقایسه‌ی بهبود استحکام حاصل از ایجاد شیار در صفحه خارجی چسبنده با پخ زدن چسبنده در اتصالات چسبی تک لبه‌ای

بهادر بهرامی¹، مجیدرضا آیت‌اللهی^{2*}، محمدجواد بیگزرای³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، m.ayat@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 98/09/09 پذیرش: 99/06/22	در این پژوهش، برای ارزیابی بهبود استحکام اتصال چسبی تک‌لبه‌ای دو نوع از تغییر هندسی چسبنده به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. پخ‌زدن چسبنده و ایجاد شیار خارجی در چسبنده به عنوان روش‌هایی برای اصلاح اتصال چسبی تک‌لبه‌ای در نظر گرفته شد. زاویه‌ی پخ در چسبنده به صورتی انتخاب شد که سرتاسر طول همپوشانی توسط پخ پوشش داده شود. از طرف دیگر مقدار بهینه‌ی عمق، پهنا و فاصله از انتهای طول همپوشانی به عنوان متغیرهای اصلی شیار خارجی ایجاد شده در چسبنده توسط مدلسازی‌های اجزاءمحدود به دست آمد. سپس، اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای شامل اتصال ساده و اتصالات بهبود یافته با روش پخ زدن و ایجاد شیار ساخته و آزمون تجربی گرفته شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که هر دو روش پخ‌زدن چسبنده و شیاردار کردن چسبنده، استحکام اتصال چسبی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. همچنین بار شکست اتصالاتی که توسط پخ اصلاح شده بودند اندکی از بار شکست اتصالاتی که با شیار بهبود داده شده بودند کمتر بود که نتایج عددی نیز این نکته را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود و تست‌های تجربی صورت گرفته نشان می‌دهد که هر دو روش ایجاد شیار در سطح خارجی چسبنده و پخ زنی چسبنده می‌توانند به میزان قابل توجهی استحکام اتصال را بهبود دهند.

Strength improvement by mean of adherend notching and adherend taper in the adhesive single lap joints

Bahador Bahrami, Majid Reza Ayatollahi*, Mohammad Javad Beigrezaee

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, m.ayat@iust.ac.ir

Keywords

Adhesive single lap joint
Strength improvement
Finite element method
Experimental method
Brittle adhesive

Abstract

In this paper, in order to evaluate the strength improvement of adhesive single lap joints (SLJs), two kinds of adherend geometrical modifications were studied numerically and experimentally. Adherend tapering and adherend notching were considered as the SLJ modification approaches. The taper angle was assumed so that the whole overlap length covered by the taper. On the other side, the optimum values for depth, width and distance from overlap ends as the major notch parameters were acquired by using finite element simulation. Then, the simulated SLJs including an unmodified joint and the modified ones with taper and notch were fabricated and experiments were performed on them. The experiments revealed that both adherend tapering and adherend notching modification methods increase the SLJs strength significantly. In addition, the failure loads of the SLJs with taper modification are a bit less than the failure loads of the ones with notch modification. A similar observation was seen in the results of finite element analyses. The finite element analysis and the experimental results showed that both outer notch and taper modification method could increase the strength of the SLJs significantly.

1- مقدمه

اصطکاکی اتصالات چسبی به دلیل برتری نسبت به سایر اتصالات در برخی از کاربردها بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به استفاده‌ی گسترده از اتصالات چسبی در صنایعی نظیر خودروسازی، هوایی و دریایی اشاره کرد. بنابراین بررسی و مطالعه‌ی ویژگی‌های مختلف این نوع

امروزه نحوه‌ی برقراری اتصال بین اجزاء مختلف یک سازه‌ی مهندسی به دلیل اهمیت وزن کلی سازه‌ها از جایگاه مهمی برخوردار است. از بین انواع مختلف اتصالات رایج مانند استفاده از پیچ و مهره و یا استفاده از جوش‌های حرارتی و

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Bahrami, B. Ayatollahi, M. R. and Beigrezaee, M. J., "Strength improvement by mean of adherend notching and adherend taper in the adhesive single lap joints", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 941-948, 2020.

از اتصالات از جمله استحکام آن‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در میان انواع مختلف اتصالات چسبی یکی از پرکاربردترین آن‌ها که در زمینه‌ی تحقیقاتی و عملی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است اتصال چسبی تک‌لبه-ای¹ می‌باشد [4]-[1]. این نوع از اتصال در عین سادگی در ساخت به دلیل نامتقارن بودن راستای بارگذاری در آن دارای توزیع تنش پیچیده‌ای می‌باشد که باعث جذابیت این نوع از اتصال برای محققان شده است. روش‌های مختلفی برای افزایش استحکام اتصال چسبی تک‌لبه‌ای ارائه شده است که در ادامه برخی از این روش‌ها مورد اشاره قرار خواهند گرفت.

عوامل بسیاری در استحکام اتصال چسبی تک‌لبه‌ای وجود دارد که در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. داسیلوا و همکارانش [5] در مطالعه‌ای با استفاده از روش تاگوچی² به بررسی تأثیر ماده، هندسه، آماده-سازی سطح و عوامل محیطی پرداختند و نشان دادند که در میان عوامل ذکر شده تأثیر طول همپوشانی³ از سایر موارد بیشتر است. آن‌ها یک نوع آماده-سازی سطح به صورت فیزیکی و دو نوع آماده‌سازی سطح به صورت شیمیایی را در مطالعه‌ی خود مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد تأثیر آماده-سازی‌های مورد استفاده قابل چشم پوشی است اما افزایش طول همپوشانی می‌تواند استحکام اتصال را افزایش دهد. همچنین در مطالعه‌ای مشابه که توسط آن‌ها انجام شد [6] تأثیرات نرمی و ضخامت چسب، استحکام تسلیم و ضخامت چسبیده، طول همپوشانی و آماده‌سازی سطح مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در نتیجه‌گیری کار خود نشان دادند که تأثیر ضخامت چسبیده و طول همپوشانی نسبت به سایر عوامل مورد بررسی از اهمیت بیشتری برخوردار است. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان می‌دهد که کاهش ضخامت چسب و افزایش ضخامت چسبیده باعث افزایش استحکام اتصال خواهد شد. یکی از عوامل مؤثر در استحکام اتصالات چسبی نفوذ رطوبت می‌باشد. خرمی‌شاد و عباسی [7] تنش‌های تورمی به وجود آمده بر اثر نفوذ رطوبت در اتصالات چسبی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که اثر تورم به وجود آمده در اتصالات با طول بزرگتر کمتر می‌باشد.

روش‌های ارائه شده برای افزایش استحکام اتصالات چسبی را می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلفی قرار داد. در یکی از این دسته‌بندی‌ها محققان با افزایش استحکام چسب به وسیله‌ی افزودنی‌ها (نظیر مواد نانو و یا الیاف طبیعی یا مصنوعی) استحکام اتصال چسبی را بهبود بخشیدند. برای مثال می‌توان به مطالعه‌ی رضوی و همکارانش [8] اشاره کرد. آن‌ها دو نوع مختلف از نانوذرات که شامل نانوذرات سیلیکا⁴ و نانولوله‌های چند دیواره‌ی کربنی⁵ بودند را با نسبت ترکیب مشخص به چسب اضافه کردند. سپس با استفاده از تحلیل عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی نشان دادند که در میان ترکیب‌های مختلف استفاده شده در بهترین حالت تا 28% و 36% بهبود به ترتیب در استحکام برشی و کششی در هنگام شکست به دست خواهد آمد. در مطالعه-ای دیگر که توسط نعمتی و همکارانش [9] انجام شد چسب با استفاده از الیاف فلزی مورد تقویت قرار گرفت. آن‌ها در بررسی خود به مطالعه‌ی تأثیر جهت الیاف‌های فلزی در چسب پرداختند و به صورت آزمایشگاهی نشان دادند که در صورت قرار دادن الیاف فلزی در راستای طولی⁶ بر همپوشانی، بهبود استحکام به دست خواهد آمد. از طرف دیگر بهبود به دست آمده توسط الیاف فلزی در راستای طولی به فاصله‌ی میان آن‌ها نیز بستگی دارد.

همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که قرارگیری الیاف در راستای عرضی⁷ باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود. همچنین در مطالعه‌ای مشابه آیت‌اللهی و همکاران [10] به بررسی عددی تأثیر فاصله‌ی ماکرو الیاف‌های فلزی بر روی توزیع تنش پوست‌کنی⁸ و برشی در اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای پرداختند که با نتایج مطالعه‌ی قبل همخوانی دارد. علاوه بر مطالعات اشاره شده می-توان به مطالعه‌ی خرمی‌شاد و رضوی [11] و آیت‌اللهی و همکارانش [12] نیز اشاره کرد. بر خلاف مطالعات اشاره شده که در آن‌ها از چسبیده‌های آلومینیومی استفاده شده بود خلیلی [13] و همکارانش از چسبیده‌های کامپوزیتی استفاده کردند و در چسب مورد استفاده برای اتصال از الیاف شیشه‌ی خرد شده و پودر الیاف شیشه استفاده کردند. آن‌ها نتایج انواع آزمون‌های کشش، خمش، ضربه و خستگی را برای بررسی تأثیر حضور الیاف شیشه‌ی خرد شده و پودر الیاف شیشه بر روی خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار دادند.

در دسته‌بندی دیگر برای افزایش استحکام اتصال چسبی تک‌لبه‌ای برخی از محققین از دو یا چند نوع چسب در ساختار اتصال استفاده کرده‌اند. داسیلوا و لوپز [14] به بررسی آزمایشگاهی روش بهبود استحکام اتصال به وسیله‌ی استفاده از چسب ترکیبی پرداختند. آن‌ها در دو انتهای طول همپوشانی از سه نوع چسب نرم⁹ مختلف استفاده کردند در حالی که در میانه‌ی طول همپوشانی از یک نوع چسب ترد¹⁰ ثابت برای تمامی حالت‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در تمامی حالت‌ها استحکام اتصال با استفاده از چسب ترکیبی از استحکام اتصال با چسب ترد به تنهایی بیشتر است. ماجادو و همکارانش [15] با استفاده از روش عددی رفتار اتصالات چسبی با چسبیده-های کامپوزیتی و چسب ترکیبی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آزمون‌های شبه‌استاتیک¹¹ و ضربه را برای کار خود انتخاب کردند و نشان دادند که روش عددی ارائه شده توسط آن‌ها می‌تواند رفتار شکست اتصالات را به خوبی پیش‌بینی کند.

اتصالات چسبی می‌توانند در ترکیب با سایر اتصالات نظیر پرچ و یا جوش نیز به کار روند که برخی از محققین افزایش استحکام در این گونه اتصالات را مورد بررسی قرار دادند. اتصالاتی که در آن‌ها از ترکیب اتصالات چسبی با اتصالات پرچ و یا جوش به وجود می‌آید اتصالات ترکیبی نام دارد که کاربردهای متنوعی در صنایع خودروسازی، هوایی و فضایی دارند [16]. اجزاء سازه‌ای از جنس پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربنی معمولاً به وسیله‌ی اتصالات ترکیبی چسب و پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند. این نوع اتصالات ترکیبی توسط مارانانو و زوکارلو [17] مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین سمایی و همکارانش [18] نیز اتصالات ترکیبی چسب و پیچ را بررسی کردند. آن‌ها رشد ترک در بارگذاری خستگی را در سه اتصال پیچی، چسبی و ترکیبی مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر پارامترهای مؤثر در اتصال ترکیبی چسب و پرچ توسط خرمی‌شاد و نصیری به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مدل ناحیه‌ی چسبناک¹² خود را مورد صحت‌گذاری قرار دادند و سپس عوامل مؤثر هندسی و مادی را با استفاده از مدل‌سازی آسیب در اتصال ترکیبی بررسی کردند [1].

7 Transversal direction
8 Peel stress
9 Ductile adhesive
10 Brittle adhesive
11 Quasi static
12 Cohesive zone model

1 Adhesive single lap joint
2 Taguchi method
3 Overlap length
4 Silica nanoparticles
5 Multi walled carbon nanotubes
6 Longitudinal direction

آوردند. در جدیدترین مطالعه که توسط آیت الهی و همکاران [29], [28] بر روی روش بهبود استحکام اتصال چسبی تکلبه‌ای به روش ایجاد شیار در سطوح داخلی چسبنده انجام شد مشخص شد که این روش می‌تواند استحکام اتصال چسبی تکلبه‌ای را تا حدود 100% بهبود دهد. بررسی‌های انجام شده به وسیله‌ی روش عددی و آزمایشگاهی بود که همخوانی مناسبی بین نتایج آن‌ها وجود داشت.

در پژوهش حاضر، بهبود استحکام ناشی از دو روش پخ‌زدن چسبنده و ایجاد شیار در صفحه‌ی خارجی چسبنده به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با استفاده از روش اجزاءمحدود⁸ توزیع تنش پوست‌کنی در لایه‌ی میانی چسب در سه اتصال بدون تغییر، با چسبنده‌ی پخ‌زده و با چسبنده‌ی شیاردار به دست آمده است. سپس با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی بار شکست آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفته و بر روی نتایج به دست آمده بحث شده است.

2- روش اجزاءمحدود

برای بررسی تاثیر پخ‌زدن چسبنده و شیار در چسبنده روی توزیع تنش لایه-ی میانی چسب در اتصال چسبی تکلبه‌ای از روش اجزاءمحدود استفاده شد. همچنین یک اتصال چسبی تکلبه‌ای ساده نیز به عنوان اتصال مبنا مدل‌سازی شد تا توزیع تنش اتصالات تغییر یافته با آن مقایسه شود. جنس چسبنده‌ها و چسب در مدل‌سازی انجام شده به ترتیب آلومینیوم 7075 و اوهو اندفست 300 در نظر گرفته شد که خواص مکانیکی آن‌ها در جدول 1 آمده است. دلیل استفاده از آلومینیوم 7075 به عنوان چسبنده فراوانی کاربرد این ماده در پژوهش‌های صورت گرفته بر روی اتصالات چسبی و علت استفاده از چسب اوهو اندفست 300 بارپذیری بالا و رفتار ترد آن است. لازم به ذکر است که با توجه به مطالعه‌ی رستگار و همکارانش رفتار تنش-کرنش چسب انتخاب شده با در نظر گرفتن کرنش شکست کمتر از 2% تقریباً ترد می‌باشد.

جدول 1 خواص مکانیکی چسب و چسبنده [30]

Table 1 Mechanical properties of adhesive and adherend [30]

ماده	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون
آلومینیوم 7075 (چسبنده‌ها)	70	0.33
اوهو اندفست 300 (چسب)	2.3	0.4

ابعاد هندسی اتصال چسبی تکلبه‌ای ساده که به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته شده بود برای اتصالات با تغییر پخ‌خورده و شیار نیز استفاده شد تا تأثیر متغیرهای ابعادی در توزیع تنش لایه‌ی میانی چسب نقشی نداشته باشند. ابعاد ثابت برای تمامی اتصالات شامل طول همپوشانی (L)، طول آزاد (free)، ضخامت چسب (t) و ضخامت چسبنده (T) به ترتیب برابر با 30، 0.4 و 5 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به ایجاد سوراخ در انتهای قطعات چسبنده برای بارگذاری به وسیله‌ی پین، 5 میلی‌متر نیز طول برگه⁹ (tab) در نظر گرفته شد تا ابعاد مدل‌سازی‌ها با ابعاد اتصالات ساخته شده در آزمایشگاه یکسان باشد.

در اتصال چسبی بهبود یافته به وسیله‌ی پخ با توجه به مطالعه‌ی ساناکتار و نیرانتار [20] زاویه‌ی پخ در حدود 7.13 درجه در نظر گرفته شد تا علاوه بر کم بودن زاویه‌ی پخ تمام طول همپوشانی نیز توسط پخ پوشش داده شود. اما

یکی دیگر از روش‌های افزایش استحکام اتصالات چسبی تغییر هندسی در چسبنده‌ها است که یکی از مناسب‌ترین تغییرات مورد مطالعه ایجاد پخ¹ در چسبنده است. آمارو و همکارانش [19] به بررسی سه نوع پخ شامل پخ در چسب²، پخ‌خوردگی داخلی³ و پخ‌خوردگی خارجی⁴ چسبنده پرداختند اما نتایج کار خود را با اتصال چسبی بدون تغییر مقایسه نکردند. ساناکتار و نیرانتار [20] به صورت آزمایشگاهی و عددی نشان دادند که با کمترین مقدار زاویه‌ی پخ می‌توان بیشترین بهبود را به دست آورد. آن‌ها با توجه به نتایج عددی بهترین زاویه‌ی پخ را 10° اعلام کردند و از همین زاویه نیز برای آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. همچنین با استفاده از مدل ناحیه‌ی چسبناک رفتار آسیب اتصالات چسبی پخ‌زده تحت بارگذاری خستگی توسط شجاعی‌فرد و همکارانش [21] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از روش پخ‌زدن چسبنده‌ها و افزایش طول همپوشانی می‌توان عمر خستگی را تا حد قابل توجهی افزایش داد.

یکی دیگر از تغییرات هندسه‌ی چسبنده برای افزایش استحکام اتصال چسبی تغییر هندسه‌ی سطح اتصال چسبنده‌ها می‌باشد. برای مثال کامپیلهو و همکارانش [22] با استفاده از خمش معکوس⁵ در چسبنده استحکام اتصال را حدود 162% برای چسب ترد و حدود 27% برای چسب نرم بهبود دادند. اشرفی و همکارانش [23] تأثیر استفاده از سطح سینوسی در سطح اتصال چسبنده‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در صورت استفاده از موج سینوسی منفی استحکام اتصال کاهش می‌یابد در حالی که موج سینوسی مثبت می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش استحکام اتصال داشته باشد. همچنین آیت‌اللهی و همکارانش [24] تأثیر سطح اتصال سینوسی را بر رفتار خستگی اتصال چسبی تکلبه‌ای مورد بررسی قرار دادند.

یکی دیگر از روش‌های افزایش استحکام اتصال چسبی به کمک تغییر در هندسه اتصال ایجاد شیار در چسبنده⁶ می‌باشد. ساناکتار و سیمونز [25] شیار در چسبنده در داخل و خارج از صفحه‌ی سطح اتصال را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار دادند. همچنین تأثیر نرمی و تردی چسب را برای تعدادی از حالت‌ها مورد مطالعه قرار دادند. نتایج عددی محاسبه شده به غیر از یک مورد با نتایج تجربی همخوانی نداشت و در حالی که بهبودهای به دست آمده در تحلیل‌های عددی بسیار بالا بود اما آزمون‌های آزمایشگاهی نتایج عددی به دست آمده را تأیید نکردند. یان و همکارانش [26] شیارهایی موازی یکدیگر در میانه‌ی طول همپوشانی و در خارج از صفحه‌ی سطح اتصال در چسبنده ایجاد کردند. آن‌ها تأثیر این شیارها را در کنار پخ زدن چسب با زاویه‌ی 45° تنها به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی توزیع تنش‌های مختلف در لایه‌ی میانی چسب پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن شیارهای موازی⁷ در میانه‌ی طول همپوشانی باعث افزایش سطح توزیع تنش در میانه‌ی طول همپوشانی و کاهش چشمگیر بیشینه‌ی تنش‌ها در انتهای طول همپوشانی خواهد شد. در مطالعه‌ی دیگر پینتو و همکارانش [27] اثر ایجاد شیار با پهنای مختلف و شروع از انتهای طول همپوشانی را بر روی استحکام اتصال چسبی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مدل ناحیه‌ی چسبناک و آزمون‌های آزمایشگاهی در بهترین هندسه‌ی مورد مطالعه‌ی خود تا 21.2% بهبود در استحکام را به دست

1 taper

2 Adhesive taper

3 Inside taper

4 Outside taper

5 Reverse bending

6 Adherend notching

7 Parallel slots

8 Finite element method

9 tab

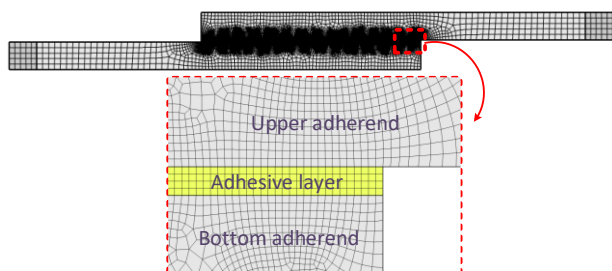


Fig. 3 Mesh size and geometry for unmodified single lap joint

شکل 3 اندازه و شکل مش در اتصال چسبی تک‌لبه‌ای معمولی

لازم به ذکر است که برای رسیدن به تعداد المان مناسب و رسیدن به نتایج مستقل از المان، آزمون استقلال از شبکه برای دو اتصال بدون تغییر و با تغییر پخ‌زده انجام شد. برای این کار المان‌های لایه‌ی چسب به صورت مربعی در نظر گرفته شدند و تنها با افزودن تعداد گره در راستای ضخامت چسب، تعداد المان‌ها برای کل هندسه مشخص شد. همانطور که شکل 4 نشان می‌دهد، با افزایش تعداد المان بیش از 900 در لایه‌ی چسب، نتایج مربوط به بیشینه‌ی تنش پوست‌کنی در لایه‌ی میانی چسب تغییر چندانی ندارد. با این حال تعداد المان لایه‌ی میانی چسب در تمام مدل‌سازی‌های انجام شده 1600 بود. همانطور که در شکل 3 نیز نشان داده شد، تعداد 1600 المان در لایه‌ی چسب برابر با تعداد 4 گره در راستای ضخامت چسب می‌باشد.

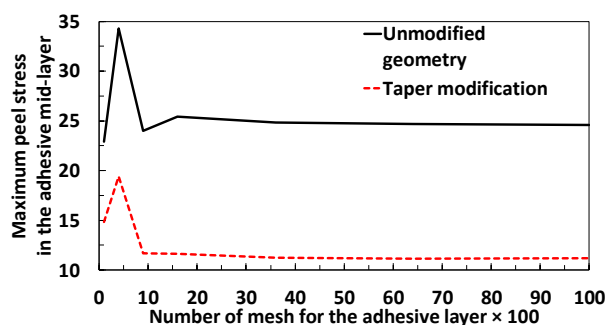


Fig. 4 The results for the mesh dependency test

شکل 4 نتایج آزمون استقلال از شبکه

برای مقایسه‌ی بهبود به روش پخ‌زنی و شیار چسبنده با اتصال چسبی معمولی از مطالعه‌ی تنش پوست‌کنی لایه‌ی میانی چسب استفاده شد. با توجه به ثابت بودن تمامی ابعاد در اتصالات چسبی بدون تغییر و با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده در ابتدا توزیع تنش پوست‌کنی در لایه‌ی میانی چسب در آن‌ها محاسبه شد. با توجه به اینکه متغیرهای شیار چسبنده می‌تواند در بهبود استحکام نقش مهمی داشته باشد بنابراین برای مشخص کردن مناسب‌ترین حالت برای ابعاد شیار چسبنده مدل‌سازی‌هایی انجام شد.

در ابتدا عمق شیار در مدل‌سازی‌های مربوط به اتصال چسبی با تغییر شیار چسبنده مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل‌سازی‌ها پهنای شیار ثابت 5 میلی‌متر در نظر گرفته شد و فاصله از انتهای طول همپوشانی 5، 2.5، 0، 2.5 و 5 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای بررسی تأثیر نسبت عمق در بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی نسبت عمق‌های 30% تا 70% در این مرحله مورد مطالعه قرار گرفت. سپس در هر مدل‌سازی بیشینه‌ی تنش پوست‌کنی در لایه‌ی میانی چسب استخراج شد که نتایج این مدل‌سازی‌ها در شکل 5 آمده است. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است با افزایش

برای اتصال چسبی بهبود یافته به وسیله‌ی شیار سه متغیر مختلف شیار شامل عمق شیار (a)، پهنای شیار (b) و فاصله‌ی آن تا انتهای طول همپوشانی (np) مطابق با شکل 1 به صورت جامع توسط مدل‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین شکل 1 ابعاد هندسه‌ی اتصال چسبی تک‌لبه‌ای را نیز نشان می‌دهد.

در ابتدا حاصل تقسیم عمق شیار بر ضخامت چسبنده به عنوان پارامتر بی‌بعد نسبت عمق (r) در نظر گرفته شد. سپس نسبت عمق‌های 10% تا 90%، پهنای 0.1 تا 20 میلی‌متر و موقعیت‌های 25- تا 35 میلی‌متر به عنوان فاصله از انتهای طول همپوشانی برای شیار به صورت مجزا تحلیل شد.

برای مطالعه‌ی نتایج به دست آمده از تنش پوست‌کنی لایه‌ی میانی چسب استفاده شد و ابعاد مناسب برای شیار با توجه به کمترین تنش پوست‌کنی به دست آمده انتخاب شد. در نهایت توزیع تنش‌های به دست آمده از لایه‌ی میانی چسب در سه اتصال بدون تغییر، با تغییر پخ‌زده و با تغییر شیار چسبنده مورد مقایسه قرار گرفت.

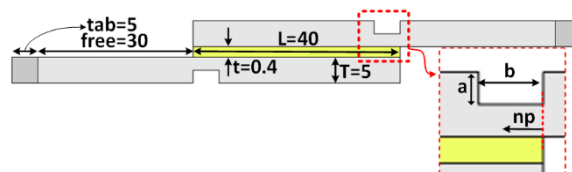


Fig. 1 Schematic geometry of the modified single lap joint with adherend notching (dimensions in mm)

شکل 1 شماتیک هندسه‌ی اتصال تک‌لبه‌ای بهبود یافته به وسیله‌ی شیار در چسبنده (ابعاد به میلی‌متر)

برای شبیه‌سازی شرایط مرزی همانگونه که در شکل 2 قابل مشاهده است محل قرارگیری پین در سمت چپ در هر دو راستای عمودی و افقی به طور کامل مقید شد تا این بخش از اتصال به عنوان بخش ثابت در نظر گرفته شود. همچنین محل قرارگیری پین در سمت راست به عنوان محل بارگذاری در نظر گرفته شد. بنابراین در راستای عمودی مقید و در راستای افقی بار گسترده‌ی 5 کیلو نیوتون اعمال شد.

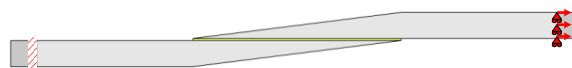


Fig. 2 Schematic geometry and boundary condition for the modified joint with taper shape

شکل 2 شماتیک هندسه و شرایط مرزی برای اتصال بهبود یافته به وسیله‌ی پخ

اتصالات به صورت الاستیک خطی دو بعدی و کرنش صفحه‌ای مدل شدند که ضخامت قطعات در راستای عمود بر صفحه 20 میلی‌متر در نظر گرفته شد تا با قطعات آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد. همچنین المان‌های استفاده شده در مش‌بندی به صورت المان‌های چهاروجهی¹ در نظر گرفته شد که شکل 3 بخشی از مش‌بندی هندسه‌ی اتصال چسبی تک‌لبه‌ای بدون تغییر را نشان می‌دهد.

شده در این مطالعه می‌توان به این نتیجه رسید که موقعیت مطلوب برای شیار حدوداً 2 میلی‌متر در داخل طول همپوشانی می‌باشد.

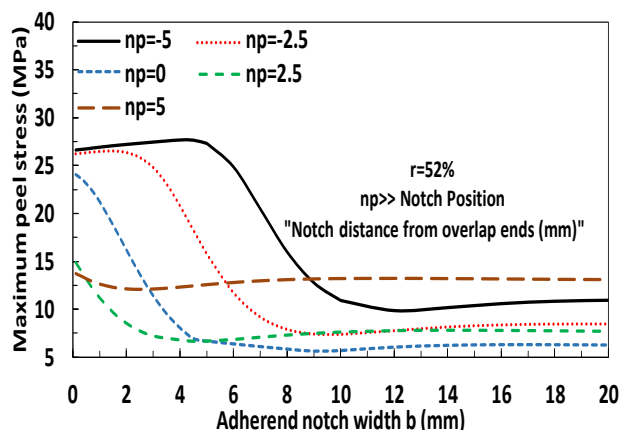


Fig. 6 Effect of adherend notch width on the maximum peel stress distribution

شکل 6 تأثیر پهنای شیار چسبنده بر روی بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی

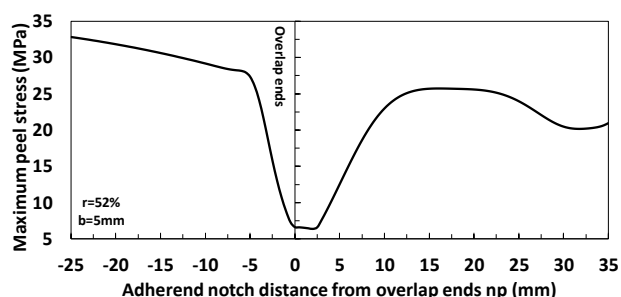


Fig. 7 Effect of adherend notch distance from overlap ends on the maximum peel stress distribution

شکل 7 تأثیر فاصله‌ی شیار چسبنده از انتهای طول همپوشانی بر روی بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی

پس از به دست آمدن پارامترهای بهینه برای شیار چسبنده توزیع تنش پوست‌کنی لایه‌ی میانی چسب برای اتصال چسبی تک‌لبه‌ای با تغییر شیار چسبنده با توزیع تنش پوست‌کنی در لایه‌ی میانی چسب در اتصال‌های بدون تغییر و با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده مقایسه شد. همانطور که شکل 8 مقایسه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی در سه اتصال بدون تغییر، با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده و با تغییر چسبنده‌ی شیاردار را نشان می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده توزیع تنش پوست‌کنی را تا حدود 115% نسبت به اتصال بدون تغییر کاهش می‌دهد. این در حالی است که تغییر چسبنده‌ی شیاردار توزیع تنش پوست‌کنی را تا حدود 295% نسبت به اتصال بدون تغییر کاهش می‌دهد. از طرف دیگر نه تنها تغییر چسبنده‌ی شیاردار تنش پوست‌کنی را تا حدود 83% نسبت به اتصال با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده کاهش می‌دهد بلکه بیشینه‌ی تنش پوست‌کنی را از انتهای طول همپوشانی به طرف داخل طول همپوشانی منتقل می‌کند. در حالی که در اتصال با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده تنها ابتدا و انتهای طول همپوشانی تحت تنش قرار دارد اما در اتصال با تغییر چسبنده‌ی شیاردار در طول همپوشانی نیز تنش وجود دارد که نشان می‌دهد بخش بیشتری از چسب تحت بارگذاری قرار گرفته است و می‌تواند در انتقال بار نقش داشته باشد.

نسبت عمق شیار چسبنده بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این الگو تنها در حالتی که شیار به طور کامل در داخل طول همپوشانی باشد برقرار است و در صورتی که شیار در خارج از طول همپوشانی قرار داشته باشید بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی با افزایش نسبت عمق شیار افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که نسبت عمق مناسب برای شیار مقدار 52% می‌باشد.

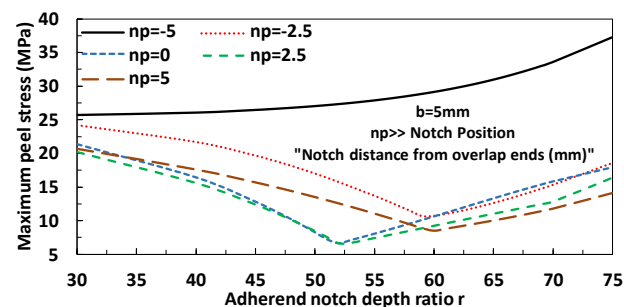


Fig. 5 Effect of adherend notch depth ratio on the maximum peel stress distribution

شکل 5 تأثیر نسبت عمق شیار چسبنده بر روی بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی

در مرحله‌ی دوم برای مشخص کردن ابعاد هندسه‌ی شیار چسبنده نسبت عمق شیار 52% ثابت در نظر گرفته شد. سپس پهنای شیار از مقدار 0.1 تا 20 میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین مشابه با بررسی نسبت عمق، فاصله از انتهای طول همپوشانی -5، -2.5، 0، 2.5 و 5 میلی‌متر نیز برای این بررسی انتخاب شد که نتایج مدلسازی‌ها در شکل 6 نشان داده شده است. باید توجه شود که فاصله از انتهای طول همپوشانی منفی بدین معناست که ابتدای پهنای شیار در خارج از طول همپوشانی قرار دارد. برای مثال در صورتی که طول همپوشانی -5 میلی‌متر و پهنای شیار نیز 5 میلی‌متر باشد شیار چسبنده به طور کامل خارج از طول همپوشانی و دقیقاً در انتهای طول همپوشانی قرار دارد. مطابق با شکل 6 در صورتی که شیار خارج از طول همپوشانی قرار داشته باشد افزایش پهنای آن باعث افزایش بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی می‌شود. این در حالی است که اگر بخشی از شیار در داخل طول همپوشانی قرار بگیرد بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که کمترین مقدار برای بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی زمانی است که شیار تقریباً در نزدیکی انتهای طول همپوشانی قرار داشته باشد و پهنای آن از حدود 5 میلی‌متر بیشتر باشد. شکل 6 نشان می‌دهد که با توجه به موقعیت شیار افزایش پهنای شیار بر روی بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی تأثیر زیادی ندارد و با توجه به توضیحات گفته شده می‌توان پهنای شیار 5 میلی‌متر را به عنوان پهنای مطلوب در نظر گرفت.

پس از تعیین عمق بهینه‌ی 52% و پهنای بهینه‌ی 5 میلی‌متر برای شیار، در مرحله‌ی آخر موقعیت شیار مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به طول کل قطعه موقعیت‌های 25- تا 35 میلی‌متر برای مطالعه در نظر گرفته شد که شکل 7 نتیجه‌ی این مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که در تأیید نتایج به دست آمده در شکل 6 بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی با ورود شیار به داخل طول همپوشانی به شدت کاهش می‌یابد. اما پس از فاصله گرفتن از انتهای طول همپوشانی مجدداً افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به هندسه‌ی کلی اتصال چسبی تک‌لبه‌ای مدلسازی

مطابق با مواد استفاده شده در مدلسازی عددی از آلومینیوم 7075 به عنوان چسبنده و چسب دو جزئی بر پایه‌ی اپوکسی اوهو اندفست 300 به عنوان چسب برای ساخت اتصالات استفاده شد. طبق دفترچه‌ی اطلاعات ارائه شده برای چسب اوهو اندفست 300 [31] چندین حالت برای ترکیب و پخت چسب وجود دارد که خواص مکانیکی متفاوتی را به دست می‌دهد. با توجه به کرنش تسلیم ترکیب 1 به 2 وزنی خشک‌کننده¹ به چسب² و پخت 5 دقیقه- ای در دمای 165 درجه‌ی سانتیگراد که در مطالعه‌ی آیت‌اللهی [32] و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است می‌توان رفتار شکست این حالت از چسب را ترد در نظر گرفت.

علاوه بر شرایط پخت و ترکیب چسب شرایط آماده‌سازی سطح چسبنده-ها نیز مورد اهمیت است. روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی سطح چسبنده-ها وجود دارد که برخی از آن‌ها در مطالعه‌ی داسیلوا و همکارانش [6], [5] مورد مقایسه قرار گرفته است. آن‌ها در این مطالعات نشان دادند که تفاوت چندانی بین استفاده از روش‌های مکانیکی و شیمیایی در افزایش استحکام اتصالات چسبی وجود ندارد. در مطالعاتی دیگر [25], [20], [19] که از چسبنده‌ی آلومینیومی استفاده شد از کاغذ سنباده با شماره‌های مختلف برای آماده‌گی سطح استفاده شد. با توجه به این مطالعات کاغذ سنباده با شماره 150 انتخاب شد. همچنین قبل و بعد از عملیات سنباده‌زنی قطعات چسبنده توسط استون³ شست و شو داده شدند تا سطح اتصال از هرگونه مواد اضافی پاک شود.

هندسه‌ی به کار رفته در مدلسازی‌های اجزا محدود صورت گرفته نیز برای ساخت قطعات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت که هندسه و ابعاد چسبنده‌های ساخته شده در شکل 10 آمده است. همچنین ضخامت چسب در تمامی اتصالات 0.4 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

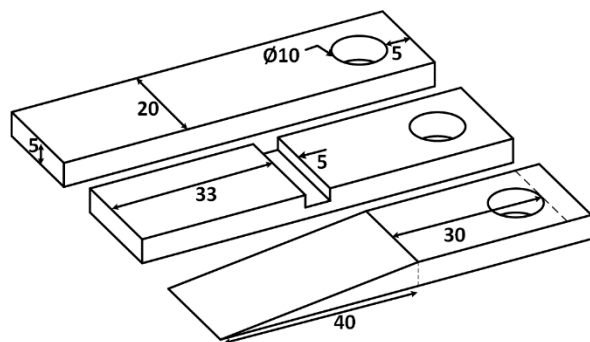


Fig. 10 Schematic of adherends geometry (dimension in mm)

شکل 10 شماتیک هندسه‌ی چسبنده‌ها (ابعاد به میلی‌متر)

یکی از موارد مهم در ساخت اتصالات چسبی یکنواخت بودن ضخامت چسب در طول همپوشانی می‌باشد. برای اطمینان از یکنواخت بودن ضخامت چسبنده و همچنین قرار گیری قطعات چسبنده در یک راستا از یک قید و بند که در شکل 11 آمده است استفاده شد. در شکل 11 قطعات آماده‌ی قرار گیری در کوره برای مرحله‌ی پخت چسب می‌باشند.

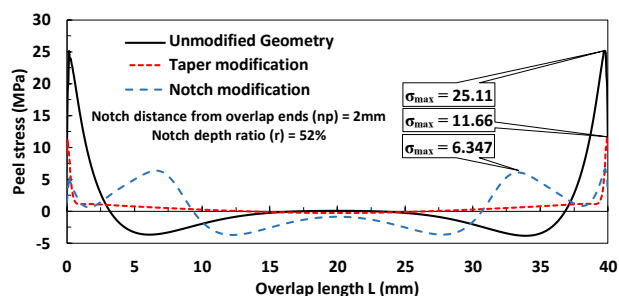


Fig. 8 Peel stress distributions of analyzed single lap joints

شکل 8 توزیع تنش پوست‌کنی اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای بررسی شده

همانطور که اشاره شد به طور معمول تنش مخرب در اتصال چسبی ساخته شده با چسب ترد تنش پوست‌کنی می‌باشد. با این وجود توزیع تنش برشی در سه اتصال بدون تغییر و با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده و شیاردار در شکل 9 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به توزیع تنش برشی نشان می‌دهد که در حدود 148% کاهش در بیشینه‌ی تنش برشی برای اتصال با چسبنده‌ی پخ‌زده در مقایسه با اتصال بدون تغییر به دست می‌آید. این در حالی است که تغییر چسبنده‌ی شیاردار تا حدود 157% کاهش را در بیشینه‌ی تنش برشی نسبت به اتصال بدون تغییر به دست می‌دهد.

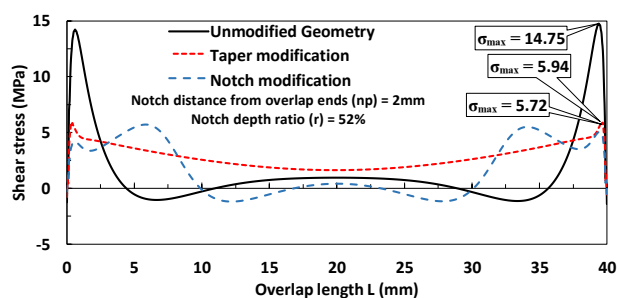


Fig. 9 Effect of adherend notch distance from overlap ends on the maximum shear stress distribution

شکل 9 تأثیر فاصله‌ی شیار چسبنده از انتهای طول همپوشانی بر روی بیشینه‌ی توزیع تنش برشی

در این بخش توزیع تنش پوست‌کنی در سه اتصال بدون تغییر، با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده و با تغییر چسبنده‌ی شیاردار به روش اجزاءمحدود محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند. برای این کار سه پارامتر عمق، پهنا و فاصله از انتهای طول همپوشانی شیار در اتصال با تغییر چسبنده‌ی شیاردار به طول کامل مورد بررسی قرار گرفت تا هندسه‌ی بهینه برای شیار به دست آید. در حالی که بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی لایه‌ی میانی چسب به عمق شیار وابسته است اما به پهنای شیار وابستگی چندانی ندارد. همچنین مشخص شد که شیار باید در فاصله‌ای اندک از انتهای طول همپوشانی قرار گیرد تا حالت بهینه به دست آید. در پایان با مقایسه‌ی توزیع تنش‌های اتصالات مختلف مشخص شد که اتصال با تغییر چسبنده‌ی شیاردار بیشترین کاهش را در بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی دارد.

3- فرایند آزمایش‌ها

پس از مدلسازی‌های عددی و تعیین هندسه‌ی اتصالات برای بررسی تأثیر تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده و چسبنده‌ی شیاردار بر روی بار شکست اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای نمونه‌هایی از اتصالات ساخته شد تا مورد آزمون قرار گیرند.

1 Hardener
2 Binder
3 Acetone

چسب به صورتی تغییر پیدا می‌کند که تنش مخرب موجود در چسب (که در حالت استفاده از چسب ترد معمولاً تنش پوست‌کنی می‌باشد) کاهش می‌یابد. این کاهش تنش به وسیله‌ی تغییر در سفتی چسبنده‌ها به دلیل حضور شیار و یا ایجاد پخ در هندسه‌ی آن‌ها می‌باشد

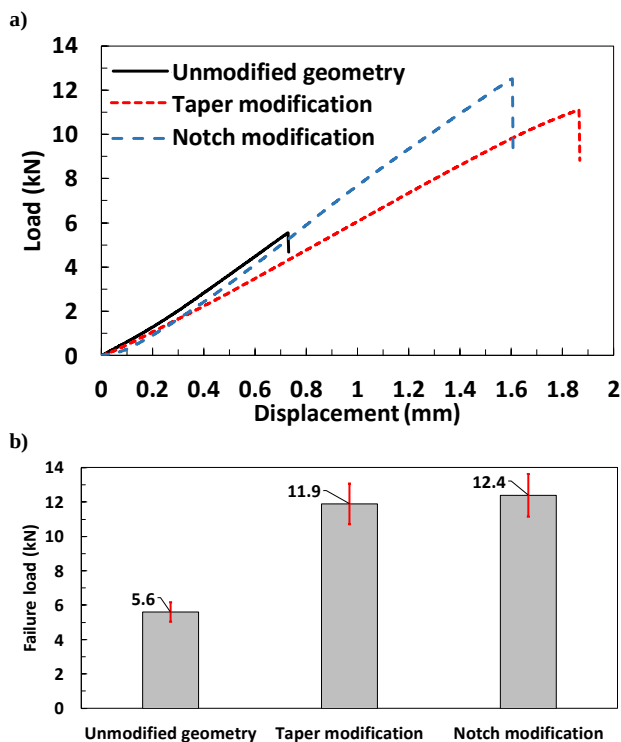


Fig. 12 a) sample load-displacement for a set of SLJs, b) Average failure loads of fabricated SLJs

شکل 12 a) نمونه‌ای از نمودار بار-جابجایی برای مجموعه‌ای از اتصالات چسبی تک-لبه‌ای (b) میانگین بار شکست اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای ساخته شده

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی دو روش بهبود استحکام اتصال چسبی با نام‌های پخ زنی در چسبنده و ایجاد شیار در چسبنده معرفی و با یکدیگر مقایسه شدند. در ابتدا با استفاده از روش اجزاءمحدود توزیع تنش پوست‌کنی در اتصالات مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. برای این کار عمق، پهنا و فاصله‌ی شیار از انتهای طول همپوشانی اتصال چسبی با چسبنده‌ی شیاردار مورد بررسی قرار گرفت تا هندسه‌ی بهینه برای چسبنده‌ی شیاردار مشخص شود. این بررسی نشان داد در صورتی که شیار در داخل طول همپوشانی قرار داشته باشد پهنای آن تأثیری در بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی ندارد. از طرف دیگر فاصله‌ی شیار از انتهای طول همپوشانی تأثیر مستقیم در بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی دارد به طوری که با فاصله گرفتن شیار از انتهای طول همپوشانی بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی افزایش می‌یابد. در انتهای بخش تحلیل عددی مشخص شد که بهترین بهبود در بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی با استفاده از روش ایجاد شیار در چسبنده به دست می‌آید. در ادامه، مطابق با اتصالات مدل شده در بخش تحلیل عددی، اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای برای بخش آزمایشگاهی ساخته شد. سپس بار شکست آن‌ها توسط آزمون کشش به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که هر دو روش پخ زنی در چسبنده و ایجاد شیار در چسبنده دو روش کارآمد هستند که می‌توانند

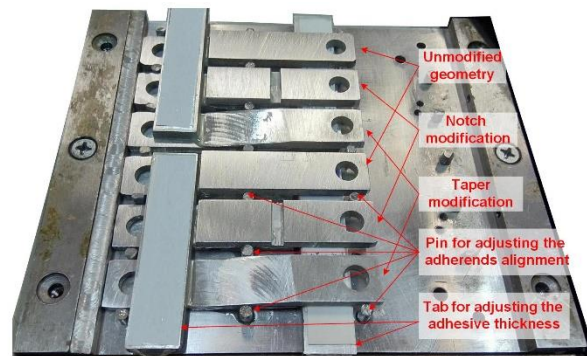


Fig. 11 The implemented fixture for fabricating the single lap joints

شکل 11 قید و بند استفاده شده برای ساخت اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای

پس از پخت اتصالات و خشک شدن کامل آن‌ها در طول 7 روز تمامی اتصالات از نظر ابعادی مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و اتصالاتی که کمتر از 5% خطا در ابعاد آن‌ها وجود داشت مورد آزمون شبه‌استاتیک قرار گرفتند. علاوه بر آن، بعد از انجام آزمون سطح شکست اتصالات مورد بررسی قرار گرفت و اتصالاتی که سطح شکست یکی از چسبنده‌ها بدون چسب بود¹ مورد قبول واقع نشد. همچنین برای هر سه نوع مختلف اتصال پنج تکرار موفق (با توجه به موارد ذکر شده) مد نظر قرار گرفت که در مجموع تعداد 15 آزمون شبه‌استاتیک انجام شد. برای انجام آزمون‌های شبه‌استاتیک از دستگاه آزمون سنتام اس‌تی‌ام-150² ساخت تهران-ایران استفاده شد. برای کم شدن حداکثری اثرات دینامیکی در آزمون سرعت 0.5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.

4- تحلیل و بررسی نتایج آزمایشگاهی

پس از انجام آزمون‌ها بار شکست اتصالات چسبی تک‌لبه‌ای بدون تغییر، با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده و با تغییر چسبنده‌ی شیاردار که در شکل 12 آمده است ثبت شد. مطابق با شکل 12 بار شکست اتصالات با تغییرات در چسبنده بیش از دو برابر بیشتر از بار شکست در اتصالات بدون تغییر است. همچنین بار شکست در اتصالات با تغییر چسبنده‌ی شیاردار اندکی بیش از بار شکست در اتصالات با تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده است. قابل ذکر است که بارهای شکست به دست آمده در فرایند آزمون‌ها در حدود 5% پراکندگی داده دارند. نتایج عددی نشان داد که کاهش سطح بیشینه‌ی توزیع تنش پوست‌کنی در اتصالات با تغییر چسبنده‌ی شیاردار بسیار بیشتر از تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده است. در حالی که نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اختلاف بهبود روش-های تغییر چسبنده‌ی شیاردار و تغییر چسبنده‌ی پخ‌زده تا حدی به یکدیگر نزدیک هستند.

لازم به ذکر است که از آنجایی که شیارهای ایجاد شده در روش ایجاد شیار در چسبنده در سطوح خارجی اتصال هستند و این سطوح تحت بارهای فشاری قرار دارد این شیارها باعث کاهش استحکام چسبنده نمی‌شوند. از طرف دیگر باید دقت داشت که عمق شیار در روش چسبنده‌ی شیاردار نقش بسیار مهمی را در کاهش سطح تنش پوست‌کنی ایفا می‌کند. بنابراین لازم است روش چسبنده‌ی شیاردار با توجه به استحکام چسب و چسبنده انتخاب شود. به صورت کلی می‌توان عنوان کرد که در هر دو روش ایجاد شیار در چسبنده و پخ زنی در چسبنده جریان نیرو و انتقال آن از چسبنده‌ها به داخل

1 Adhesive fracture surface

2 SANTAM@ STM-150 universal testing machine

- [15] Machado, J. J. M., Gamarra, P. -R., Marques, E. A. S., and da Silva, L. F. M., "Numerical Study Of The Behaviour Of Composite Mixed Adhesive Joints Under Impact Strength For The Automotive Industry," *Compos. Struct.*, Vol. 185, No. 5, pp. 373–380, 2018.
- [16] da Silva, L. F. M., Ochsner, A., and Pirondi, A., *Hybrid Adhesive Joints*, Vol. 6. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [17] Marannano, G. and Zuccarello, B., "Static Strength And Fatigue Life Of Optimized Hybrid Single Lap Aluminum-CFRP Structural Joints," *J. Adhes.*, Vol. 94, No. 7, pp. 501–528, 2018.
- [18] Samaei, M., Zehsaz, M., and Chakherlou, T. N., "Experimental And Numerical Study Of Fatigue Crack Growth Of Aluminum Alloy 2024-T3 Single Lap Simple Bolted And Hybrid (Adhesive/Bolted) Joints," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 59, pp. 253–268, 2016.
- [19] Amaro, A. M., Neto, M. A., Loureiro, A., and Reis, P. N. B., "Taper's Angle Influence On The Structural Integrity Of Single-Lap Bonded Joints," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, Vol. 96, pp. 231–246, 2018.
- [20] Sancaktar, E. and Nirantar, P., "Increasing Strength Of Single Lap Joints Of Metal Adherends By Taper Minimization," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 5, pp. 655–675, 2003.
- [21] Shojaefard, M. H., Saeidi Googarchin, H., Gheibi, M. R., and Nik-khah, M. A., "Simulation And Strength And Fatigue Life Improvement Of Adhesively Bonded Single Lap Joint Using Cohesive Zone Model With Cyclic Degradation," *Modares Mech. Eng.*, Vol. 16, No. 5, pp. 281–289, 2016.
- [22] Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. M. G., Banea, M. D., Silva, R. F., and Da Silva, L. F. M., "Strength Improvement Of Adhesively-Bonded Joints Using A Reverse-Bent Geometry," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 25, No. 18, pp. 2351–2368, 2011.
- [23] Ashrafi, M., Ajdari, A., Rahbar, N., Papadopoulos, J., Nayeb-Hashemi, H., and Vaziri, A., "Adhesively Bonded Single Lap Joints With Non-Flat Interfaces," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 32, No. 1, pp. 46–52, 2012.
- [24] Ayatollahi, M. R., Samari, M., Razavi, S. M. J., and da Silva, L. F. M., "Fatigue Performance Of Adhesively Bonded Single Lap Joints With Non-Flat Sinusoid Interfaces," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 40, No. 9, pp. 1355–1363, 2017.
- [25] Sancaktar, E. and Simmons, S. R., "Optimization Of Adhesively-Bonded Single Lap Joints By Adherend Notching," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 14, No. 11, pp. 1363–1404, 2000.
- [26] Yan, Z.-M., You, M., Yi, X.-S., Zheng, X.-L., and Li, Z., "A Numerical Study Of Parallel Slot In Adherend On The Stress Distribution In Adhesively Bonded Aluminum Single Lap Joint," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 27, No. 8, pp. 687–695, 2007.
- [27] Pinto, A. M. G., Ribeiro, N. F. Q. R., Campilho, R. D. S. G., and Mendes, I. R., "Effect Of Adherend Recessing On The Tensile Strength Of Single Lap Joints," *J. Adhes.*, Vol. 90, No. 8, pp. 649–666, 2014.
- [28] Bahrami, B., Ayatollahi, M. R., Beigrezaee, M. J., and da Silva, L. F. M., "Strength Improvement In Single Lap Adhesive Joints By Notching The Adherends," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 95, No. June, p. 102401, 2019.
- [29] Beigrezaee, M. J., Ayatollahi, M. R., Bahrami, B., and da Silva, L. F. M., "Failure Load Analysis In Single Lap Joints - Effect Of Adherend Notching," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 104, No. January, pp. 75–83, 2019.
- [30] Rastegar, S., Ayatollahi, M., Akhavan-Safar, A., and da Silva, L., "Prediction Of The Critical Stress Intensity Factor Of Single-Lap Adhesive Joints Using A Coupled Ratio Method And An Analytical Model," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, Vol. 233, No. 7, pp. 1393–1403, 2019.
- [31] "UHU Plus Endfest 300 Technical Data Sheet." [Online]. Available: https://media2.supermagnete.de/docs/uhu_%0Aplus_endfest_300_eng.pdf.
- [32] Akhavan-Safar, A., Ayatollahi, M. R., Rastegar, S., and da Silva, L. F. M., "Impact Of Geometry On The Critical Values Of The Stress Intensity Factor Of Adhesively Bonded Joints," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 18, pp. 2071–2087, 2017..

استحکام اتصال چسبی را به میزان قابل توجهی بهبود دهند. همچنین تفاوت زیادی بین بار شکست اتصالات با تغییر چسبنده‌ی پخزده و شیاردار وجود ندارد با این حال بار شکست اتصالات با تغییر چسبنده‌ی شیاردار اندکی بیش از بار شکست اتصالات با تغییر چسبنده‌ی پخزده بود. به طور خلاصه، در این پژوهش نتایج عددی نشان داد که تغییر چسبنده‌ی شیاردار و پخزده تنش پوست‌کنی را به ترتیب تا 295% و 115% کاهش می‌دهد. همچنین تغییر چسبنده‌ی پخزده و شیاردار بار شکست آزمایشگاهی را به ترتیب تا 2.1 و 2.2 برابر افزایش داد.

5- مراجع

- [1] Khoramishad, H. and Nasiri, S., "Investigation Of The Effect Of Material And Geometrical Parameters Affecting The Strength Of Hybrid Adhesive- Riveted Joints," *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 2, No. 2, pp. 71–78, 2015.
- [2] Shahrokhinasab, S., Sahraeeyan, R., and Sabet, A., "Assessment Of Mixed Adhesive In Single Lap And Peel Joint With Composite Substrate," *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 4, No. 2, pp. 189–194, 2017.
- [3] Ashofteh, R. S., Pourang, H., Mobasheri, M., and Khoramishad, H., "The Effects Of Temperature Level And Stress-To-Strength Ratio On Creep Behavior Of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints," *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 5, No. 3, pp. 353–358, 2018.
- [4] Dadian, A., Rahnama, S., and Zolfaghari, A., "Strength Improvement Of Composite-Steel Lap Joint By Grading The Joint Area With Carbon And Glass Fiber And Also Mechanical Interference By Reverse Step," *J. Sci. Technol. Compos.*, in press.
- [5] da Silva, L. F. M., Carbas, R. J. C., Critchlow, G. W., Figueiredo, M. A. V., and Brown, K., "Effect Of Material, Geometry, Surface Treatment And Environment On The Shear Strength Of Single Lap Joints," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 29, No. 6, pp. 621–632, 2009.
- [6] da Silva, L. F. M., Critchlow, G. W., and Figueiredo, M. A. V., "Parametric Study Of Adhesively Bonded Single Lap Joints By The Taguchi Method," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 13, pp. 1477–1494, 2008.
- [7] Khoramishad, H. and Abbasi, Z., "Numerical Study Of The Effect Of Moisture - Induced Swelling Stresses On Damage Behavior Of Adhesive Joints Under Static Loading," *Modares Mech. Eng.*, Vol. 15, No. 3, pp. 189–198, 2015.
- [8] Razavi, S. M. J., Ayatollahi, M. R., Nemati Giv, A., and Khoramishad, H., "Single Lap Joints Bonded With Structural Adhesives Reinforced With A Mixture Of Silica Nanoparticles And Multi Walled Carbon Nanotubes," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 80, pp. 76–86, 2018.
- [9] Nemati Giv, A., Ayatollahi, M. R., Razavi, S. M. J., and Khoramishad, H., "The Effect Of Orientations Of Metal Macrofiber Reinforcements On Mechanical Properties Of Adhesively Bonded Single Lap Joints," *J. Adhes.*, Vol. 94, No. 7, pp. 541–561, 2018.
- [10] Ayatollahi, M. R., Giv, A. N., Mohamad, S., and Razavi, J., "The Effect Of Macro Fiber Reinforcements On Mechanical Behavior Of Single Lap Adhesively Bonded Joints In Two Different Orientations," *Modares Mech. Eng.*, Vol. 16, No. 1, pp. 121–128, 2015.
- [11] Khoramishad, H. and Razavi, S. M. J., "Metallic Fiber-Reinforced Adhesively Bonded Joints," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 55, pp. 114–122, 2014.
- [12] Ayatollahi, M. R., Nemati Giv, A., Razavi, S. M. J., and Khoramishad, H., "Mechanical Properties Of Adhesively Single Lap-Bonded Joints Reinforced With Multi-walled Carbon Nanotubes And Silica Nanoparticles," *J. Adhes.*, Vol. 93, No. 11, pp. 896–913, 2017.
- [13] Khalili, S. M. R., Shokuhfar, A., Hoseini, S. D., Bidkhor, M., Khalili, S., and Mittal, R. K., "Experimental Study Of The Influence Of Adhesive Reinforcement In Lap Joints For Composite Structures Subjected To Mechanical Loads," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 28, No. 8, pp. 436–444, 2008.
- [14] da Silva, L. F. M. and Lopes, M. J. C. Q., "Joint Strength Optimization By The Mixed-Adhesive Technique," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 29, No. 5, pp. 509–514, 2009.