



## اثر عیوب دوبعدی بر رفتار کششی و خزشی اتصالات چسبی تک لبه سرامیک - فلز

بشیر بهجت<sup>۱\*</sup>، فرزاد راه‌نورد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

### چکیده گرافیکی

### برجسته‌ها

- با افزایش نسبت تنش به استحکام نهایی از ۰/۴۰ به ۰/۶۰ در دمای محیط، جابه‌جایی خزشی برای اتصال دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم ۰/۴۰٪ افزایش پیدا می‌کنند.
- با افزایش دما از دمای محیط به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نیروی شکست برای سه نوع اتصال به ترتیب ۰/۴۶٪، ۰/۲۵٪ و ۰/۸۰٪ درصد کاهش می‌یابد.



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:  
نوع مقاله: علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲  
\*نویسنده مسئول:  
behjat@sut.ac.ir

### کلیدواژه‌ها:

چسب  
خزش  
استحکام برشی  
اتصال چسبی تک‌لبه

### چکیده

چسب‌های پلیمری به سبب ماهیت ویسکوالاستیک خود با گذر زمان و تحت یک بار ثابت دچار تغییر شکل خزشی می‌شوند. هدف از انجام این پژوهش بررسی تجربی اثر عیوب دوبعدی بر رفتار کششی و خزشی اتصالات چسبی تک‌لبه سرامیک-فلز با چسب آکوافلکس است. ابتدا آزمایش کشش استاتیکی در سه دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای اتصالات چسبی بدون عیب و دارای عیب در سرامیک و نیز عیوب در سرامیک و آلومینیوم صورت گرفته و سپس با اعمال نسبت‌های تنش به استحکام نهایی معادل ۰/۴۰ و ۰/۶۰، آزمایش خزش کششی انجام گرفته است. با افزایش نسبت تنش به استحکام نهایی از ۰/۴۰ به ۰/۶۰ در دمای محیط، جابه‌جایی خزشی برای اتصال بدون عیب ۰/۳۶٪، برای اتصال دارای عیب در سرامیک ۰/۳۳٪ و برای اتصال دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم ۰/۴۰٪ افزایش پیدا می‌کنند. در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد این میزان افزایش به ترتیب برای اتصال بدون عیب ۰/۳۵٪ و ۰/۱۸٪، برای اتصال دارای عیب در سرامیک ۰/۵۴٪ و ۰/۵٪ و برای اتصال دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم ۰/۳۹٪ و ۰/۴۲٪ است. همچنین با افزایش دما از دمای محیط به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نیروی شکست برای سه نوع اتصال به ترتیب ۰/۴۶٪، ۰/۲۵٪ و ۰/۸۰٪ درصد کاهش می‌یابد.

## ۱- مقدمه

عوامل محیطی پرداختند و نشان دادند که در میان عوامل ذکر شده تأثیر طول همپوشانی از سایر موارد بیشتر است. آن‌ها یک نوع آماده‌سازی سطح به‌صورت فیزیکی و دو نوع آماده‌سازی سطح به‌صورت شیمیایی را در مطالعه خود مورد بررسی قرار دادند، نتایجی که به دست آوردند تأثیر آماده‌سازی‌های مورد استفاده قابل چشم‌پوشی است؛ اما افزایش طول همپوشانی می‌تواند استحکام اتصال را افزایش دهد. همچنین در مطالعه‌ای مشابه که توسط آن‌ها انجام شد [۶] تأثیرات نرمی و ضخامت چسب، استحکام تسلیم و ضخامت چسبنده، طول همپوشانی و آماده‌سازی سطح مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در نتیجه‌گیری کار خود نشان دادند که تأثیر ضخامت چسبنده و طول همپوشانی نسبت به سایر عوامل مورد بررسی از اهمیت بیشتری برخوردار است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که کاهش ضخامت چسب و افزایش ضخامت چسبنده باعث افزایش استحکام اتصال خواهد شد.

داسیلوا و لویز [۷] به بررسی آزمایشگاهی روش بهبود استحکام اتصال به‌وسیله استفاده از چسب ترکیبی پرداختند. آن‌ها در دو انتهای طول همپوشانی از سه نوع چسب نرم مختلف استفاده کردند در حالی که در میانه طول همپوشانی از یک نوع چسب ترد 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 به‌تنهایی بیشتر است. ماچادو و همکارانش [۸] با استفاده از روش عددی رفتار اتصالات چسبی با چسبنده‌های کامپوزیتی و چسب ترکیبی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آزمون‌های شبه استاتیکی و ضربه را برای کار خود انتخاب کردند و نشان دادند که روش عددی ارائه شده توسط آن‌ها می‌تواند رفتار شکست اتصالات را به‌خوبی پیش‌بینی کند.

جوهریچ و همکارانش [۹] از سندبلاست اکسید آلومینیوم برای آماده‌سازی سطح استفاده کرده‌اند. زمان انفجار، فاصله نازل و شدت انفجار پارامترهای تأثیرگذار در زبری سطح می‌باشند. افزایش شدت انفجار باعث افزایش قابل توجه زبری سطح شده و همچنین زبری عمدتاً تحت تأثیر زمان انفجار بوده و کمتر تحت تأثیر فاصله نازل می‌باشد. استحکام نمونه‌های سندبلاست شده ۱۰ برابر نمونه‌های سندبلاست

امروزه نحوه برقراری اتصال بین اجزای مختلف یک سازه 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 اصطکاکی اتصالات چسبی به دلیل برتری نسبت به سایر اتصالات در برخی از کاربردها بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده گسترده از اتصالات چسبی در صنایعی نظیر خودروسازی، هوایی و دریایی اشاره کرد؛ بنابراین بررسی و مطالعه ویژگی‌های مختلف این نوع از اتصالات از جمله استحکام آن‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در میان انواع مختلف اتصالات چسبی یکی از پرکاربردترین آن‌ها که در زمینه تحقیقاتی و عملی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است، اتصال چسبی تک‌لبه‌ای می‌باشد [۱-۳].

این نوع از اتصال در عین سادگی در ساخت به‌دلیل نامتقارن بودن راستای بارگذاری در آن دارای توزیع تنش پیچیده‌ای می‌باشد که باعث جذابیت این نوع از اتصال برای محققان شده است. عوامل بسیاری در استحکام اتصال چسبی تک‌لبه‌ای وجود دارد که در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خزش تغییر شکل وابسته به زمان است که به‌عنوان نقص در رفتار بلندمدت مواد پلیمری به حساب می‌آید. تحت اثر یک بار ثابت که به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از استحکام نهایی ماده است، زنجیره‌های بستر پلیمری کشیده شده و دچار چرخش و لغزش روی یکدیگر می‌شوند. این امر منجر به به هم خوردن توازن ابعادی شده و نهایتاً شکست ماده را در پی خواهد داشت. در پلیمرهای خطی با زنجیره‌های مولکولی کوتاه، این پدیده سریع‌تر و در صورت وجود پیوندهای عرضی، کندتر رخ خواهد داد. خزش در مواد به عوامل مختلفی از جمله دما و سطح تنش وابسته است. با گذشت زمان حرکت اتم‌ها، مولکول‌ها و جابه‌جایی‌ها در یک ماده جامد اتفاق می‌افتد و با افزایش دما این حرکات سرعت پیدا می‌کنند [۴].

داسیلوا و همکارانش [۵] در مطالعه‌ای با استفاده از روش تاگوچی به بررسی تأثیر ماده، هندسه، آماده‌سازی سطح و

کامل آن منطقه برای مقایسه ساختند. برای پوشش مطلوب از برش‌های پلی‌تترافلوئورو اتیلن برای پوشاندن مناطق چسب استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که شکل و جهت چسب نسبت به جهت بارگذاری بر مقاومت شکست تأثیر دارد و از میان آن شکل اتصال بیضوی دارای کمترین مقاومت است.

خبازآدم و همکاران [۱۴] به بررسی رفتار خزشی اپوکسی تقویت‌شده با گرافن پرداختند. آن‌ها رفتار خزشی اتصالات تک‌لبه آلومینیوم را به چسب تقویت‌شده با نانو پلاکت گرافن در سه سطح تنش و با استفاده از مدل خزش غیرخطی نورتون-بیلی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، وجود گرافن تا ۰/۵٪ وزنی باعث کاهش فشار خزشی چسب اپوکسی به‌طور مداوم می‌شود. آزمایش خزش SLJ نشان می‌دهد که چسب با مقدار ۰/۲۵٪ وزنی گرافن باعث کاهش جابه‌جایی خزشی اتصالات به میزان ۱۲/۴٪ می‌شود.

عمده تحقیقات صورت گرفته، بررسی رفتار خزشی نمونه‌های حجمی چسب‌های اپوکسی جهت استخراج کرنش‌های خزشی بوده است و آن‌ها عموماً در سطح دمای ثابت یا سطح تنش ثابت انجام شده است. با توجه به کاربرد وسیع اتصالات چسبی در صنایع مختلف از جمله صنعت هوایی و اهمیت دوام سازه‌ها که به‌صورت هم‌زمان در معرض تنش و دماهای بالا قرار دارند و با توجه به حساسیت چسب به دماهای بالا، لزوم بررسی گسترده‌تری بر تأثیر توأمان این دو عامل بر رفتار خزشی اتصالات چسبی احساس می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار خزشی اتصال چسبی تک‌لبه ساخته‌شده با چسب آکوافلکس تحت اثرات ترکیبی دما و تنش است که با تمرکز بر تعیین درصد تخریب استحکام کششی بر اثر افزایش دما و میزان تحمل بارپذیری اتصالات چسبی و نیز تأثیر اعمال بار بر نمونه‌ها با نسبت «تنش به استحکام نهایی» ثابت بر رفتار خزشی اتصالات در سه سطح دما می‌باشد.

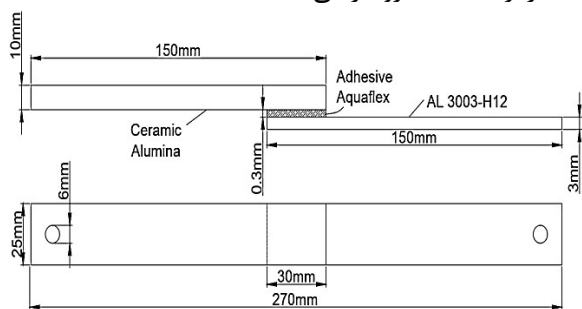
در این تحقیق بررسی می‌شود که اعمال بار به‌صورت نسبت‌های «تنش به استحکام نهایی» ثابت معادل ۰/۴۰ و ۰/۶۰ در سه سطح دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، چه تأثیری بر استحکام خزشی اتصالات چسبی خواهد داشت. به عبارتی، خزش در نسبت «تنش به استحکام نهایی» ثابت هر دما بررسی شده است و به‌جای در نظر

نشده است. اتیکاه و همکارانش [۱۰] زبری سطح میکروسکوپی در استحکام اتصال چسبی مطالعه کرده و از چسب انعطاف‌پذیر با ضخامت اتصال یکسان و از چند نوع سنباده برای تولید زبری سطح متفاوت اتصالات تک‌لبه استفاده کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند، استحکام اتصال چسب‌ها تحت تأثیر نوع چسب و زبری سطح قطعات اتصال می‌باشد.

زه‌ساز و همکارانش [۱۱] اثر ضخامت و پخش‌نی چسب را بر تغییر شکل و عمر خزشی اتصال چسبی دولبه مورد آزمایش قرار دادند. چسب مورد استفاده در این تحقیق، آرالدایت ۲۰۱۵ از نوع پایه اپوکسی است. آزمایش خزشی تک‌محوره در دمای ۶۳ درجه سانتی‌گراد جهت به دست آوردن ویژگی‌های خزشی در این دما صورت گرفته است. نتایج نشان داد که وجود فیلت در اتصال منجر به افزایش عمر خزشی و کاهش تغییر شکل خزشی اتصال شده و این در حالی است که افزایش ضخامت چسب اثر اندکی بر عمر خزشی اتصال داشته است.

خرمی‌شاد و همکارانش [۱۲] به بررسی رفتار خزشی اتصالات چسبی تقویت‌شده با نانو پلاکت اکسید گرافن پرداختند. آن‌ها در این پژوهش رفتار خزشی اتصالات چسب تقویت‌شده با نانو پلاکت‌های اکسید گرافن (GONP) با استفاده از مدل رئولوژیکی بورگرز مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه‌ای که به دست آوردند نشان می‌دهد افزودن ۰/۱٪ وزنی GONP به لایه چسب باعث کاهش کشش برش الاستیک اتصالات چسبیده به میزان ۲۱٪، ۳۱٪ و ۳۴٪ و کشش خزشی اتصالات چسبی ۲۴٪، ۳۱٪ و ۳۷٪ نسبت به مرجع می‌شود. همچنین ۰/۱٪ وزنی GONP باعث کاهش نرخ کرنش خزشی به میزان ۳۳، ۴۱ و ۲۶ درصد نسبت به نمودار اصلاح‌شده در دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. پیشارودی و همکارانش [۱۳] به بررسی تأثیر توزیع چسب بر مقاومت اتصالات چسبیده پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از روش تست غیرمخرب (NDT) برای تعیین کیفیت اتصالات در جایی که چسب ناحیه همپوشانی را به‌طور کامل پوشش نمی‌دهد، ارائه دادند. در این پژوهش از فیبر کربن به‌عنوان قطعات چسبیده و اپوکسی دو بخش به‌عنوان چسب استفاده کردند. آن‌ها ناحیه چسب را با اشکال مختلف از جمله دایروی و بیضوی و نیز با پوشش

استاندارد ASTM D1002 برش زده شد. آماده‌سازی سطح در یک فرآیند اتصال باهدف حذف آلاینده‌هایی نظیر گردوغبار، چربی، رطوبت و محصولات ناشی از خوردگی انجام می‌گردد و موجب بهبود و اصلاح ترشوندگی زیرلایه می‌شود. هدف بعدی افزایش سطح تماس بین اعضای اتصال و چسب می‌باشد که با ایجاد یک به‌هم‌پیوستگی مکانیکی، چسبندگی را به حداکثر می‌رساند [۱۲]. در این تحقیق از عملیات سندبلاست برای لایه‌برداری از سطوح آلومینیوم در فشار ۸ بار در مدت‌زمان ۱۰ دقیقه طبق استاندارد ASTM D2651 استفاده شده است. برای اتصال بهتر، بر روی سرامیک سنباده نرم با زاویه  $\pm 45^\circ$  کشیده می‌شود. برای تمیزی بهتر چسبندها، آن‌ها را در محلول استون نگه‌داشته تا از هرگونه آلودگی پاک شود. پس از انجام فرآیندهای آماده‌سازی، سطح آلومینیوم توسط دستگاه Hommelwerke مدل TK300 موجود در آزمایشگاه شناخت مواد دانشگاه صنعتی سهند با رزولوشن ۰/۱ میکرومتر زبری سنجی شد و مقادیر زبری سطح میانگین مربوط به هر یک از فرآیندها برحسب میکرومتر به دست آمده است زبری سنجی در خطی به طول ۱۰ میلی‌متر از قطعه، با سرعت پانزده صدم میلی‌متر بر ثانیه و با حرکت خودکار انجام پذیرفته است. شکل ۲ نحوه زبری‌سنجی قطعه را نشان می‌دهد. میزان زبری که به دست آمد برابر ۰/۶۵ میکرومتر می‌باشد.



شکل (۱): مشخصات هندسی اتصال تک‌لبه بدون عیب

برای آماده‌سازی نمونه‌های معیوب ابتدا برش‌های پلی‌تترافلوئورواتیلن برای پوشاندن مناطق چسب مطابق شکل ۳ و ۴ استفاده شده است. عرض نوار پلی‌تترافلوئورواتیلن ۱۰ میلی‌متر می‌باشد و با قرار دادن این نوار روی سرامیک و آلومینیوم اتصال معیوب ایجاد می‌شود. سپس سطح چسبندها به چسب آغشته شده و مطابق شکل

گرفتن یک مقدار تنش ثابت در هر سه دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب «تنش به استحکام» هر دما به‌عنوان بار خزشی ماده لحاظ شده است.

## ۲- مراحل آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد مورد استفاده

چسب مورد استفاده در این تحقیق آکوافلکس می‌باشد این چسب مقاومت چشمگیری در برابر فرسودگی و آب‌نمک دارد و برای استفاده در محیط مرطوب مناسب است. محدوده دمایی این چسب بین ۴۰- تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد است، برخی خواص این چسب در جدول ۱ آورده شده است. چسبنده استفاده‌شده در ساخت اتصالات، آلومینیوم H۱۲-۳۰۰۳ بوده که مقاومت خوبی در مقابل خوردگی دارد. برخی خواص مکانیکی این آلیاژ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در جدول ۲ نشان داده شده است. سرامیک مورد استفاده برای طرف دیگر اتصال تک‌لبه، از جنس آلومینا می‌باشد که در جدول ۳ مشخصات مکانیکی سرامیک آلومینا آورده شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی چسب آکوافلکس

چگالی	استحکام کششی	استحکام برشی	سختی
g/cm <sup>3</sup>	MPa	MPa	Shore A
۱/۴۴	۳۳	۲۱	۴۲

جدول (۲): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم H۱۲-۳۰۰۳

نسبت پواسون	مدول الاستیک	تنش نهایی	تنش تسلیم
-	GPa	MPa	MPa
۰/۳۳	۷۰	۱۳۰	۱۰۰

جدول (۳): خواص مکانیکی سرامیک آلومینا

چگالی بالک	استحکام خمشی	استحکام فشاری	سختی
g/cm <sup>3</sup>	MPa	MPa	MPa
۳/۹۶	۵۵۰	۲۶۰۰	۶

### ۲-۲- روش ساخت

برای آماده‌سازی اتصالات چسبنده ابتدا ورق آلومینیوم H۱۲-۳۰۰۳ با ابعاد ۱۵۰×۲۵×۳ میلی‌متر مکعب مطابق شکل ۱ برای استفاده در اتصال چسبی تک‌لبه طبق

ضخامت لایه چسب توسط ورق‌هایی با ضخامت یکسان کنترل می‌شود. پس از پخت اتصالات و خشک شدن کامل آن‌ها در طول ۷ روز تمامی اتصالات از نظر ابعادی و ضخامت توسط میکروسنج اندازه‌گیری شدند و اتصالاتی که کمتر از ۵٪ خطا در ابعاد آن‌ها وجود داشت مورد آزمون شبه استاتیک قرار گرفتند. همچنین برای هر سه نوع مختلف اتصال سه آزمون شبه استاتیک انجام شد. برای انجام آزمون‌های شبه استاتیک از دستگاه آزمون سنتام اس‌تی‌ام - ۲۵۰ ساخت ایران موجود در آزمایشگاه مرکزی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند استفاده شد.

### ۲-۳- آزمون کشش

جهت به دست آوردن استحکام برشی اتصال ساده تک‌لبه در دماهای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد از دستگاه کشش سنتام بهره گرفته شده است. جهت انجام آزمایش با دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها توسط گیره به دستگاه متصل و سپس پیش از اعمال نیرو، دمای موردنظر تنظیم شده و ۱۵ دقیقه به نمونه فرصت داده می‌شود تا به شرایط دمایی پایا برسد. روند آزمایش کششی مطابق استاندارد ASTM D1002 انجام شده و نرخ بارگذاری وارد شده به اتصالات توسط دستگاه برابر با ۰/۲۵ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

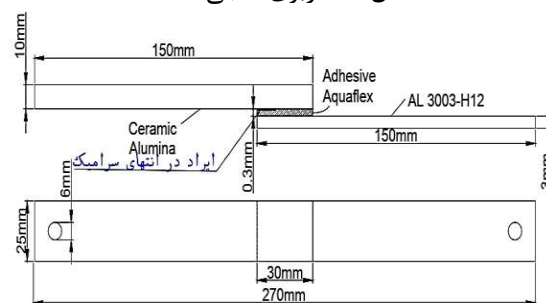
### ۲-۴- آزمون خزش

آزمون خزشی بر مبنای استاندارد ASTM D2294 صورت گرفته است. برای انجام تست خزش قبل از اعمال بار، ابتدا دمای چسبنده‌ها با قرار دادن در کوره گرمایی مطابق شکل ۶ بالا برده می‌شود و به نمونه‌ها ۱۵ دقیقه فرصت داده می‌شود تا به شرایط دمایی پایا برسد. سپس به چسبنده‌ها، ۴۰ و ۶۰ درصد استحکام برشی نهایی نیرو اعمال می‌شود. همچنین زمان انجام آزمایش از لحظه ثابت شدن نیرو، ۶۰ دقیقه است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که پس از ۶۰ دقیقه نرخ کرنش روند ثابتی دارد؛ بنابراین آزمون‌ها پس از ۶۰ دقیقه متوقف شدند.

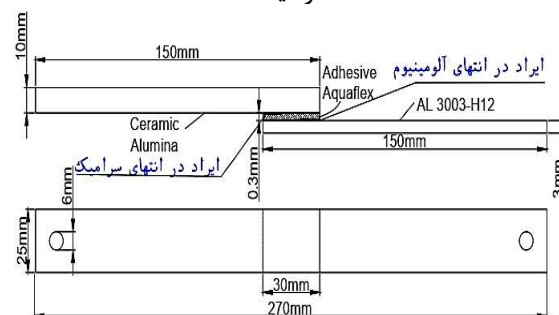
۵ نمونه‌ها درون قید و بست با فشار ۲ مگاپاسکال قرار داده می‌شوند.



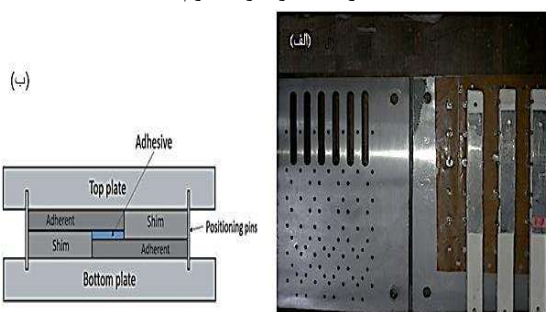
شکل (۲): زبری‌سنجی قطعات



شکل (۳): مشخصات هندسی اتصال تک‌لبه دارای عیب در سرامیک



شکل (۴): مشخصات هندسی اتصال تک‌لبه دارای عیب در سرامیک و آلومینیوم



شکل (۵): قالب ساخته‌شده برای اتصال تک‌لبه (الف) قالب با نمونه و (ب) قالب به صورت شماتیک

### ۳-۲- نتایج آزمون خزش

به‌منظور درک اثر دما و تنش بر رفتار خزشی اتصالات چسبی در سه دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و با توجه به جدول ۴، هر کدام از اتصالات با نیروی ۴۰ و ۶۰ درصد استحکام برش نهایی مورد آزمون خزشی قرار گرفتند. در آزمون خزشی در دمای محیط، قطعه دارای عیب در سرامیک به دلیل استحکام برشی کمتر نسبت به قطعه سالم، در هنگام آزمون خزشی، میزان جابه‌جایی خزشی کمتری دارد؛ اما در قطعه دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم به علت کوچک‌تر بودن مساحت ناحیه اتصال چسب، استحکام برشی چسب کمتر و خزش برشی بیشتری نسبت به انواع دیگر قطعات اتصال دارد. در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز همین رفتار در آزمون جابه‌جایی خزشی قابل‌ملاحظه است. همان‌گونه که در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است، با افزایش سطح تنش از ۴۰ به ۶۰ درصد، جابه‌جایی خزشی در دمای محیط برای اتصال بدون عیب ۳۶٪، برای اتصال دارای عیب در سرامیک ۳۳٪ و برای اتصال دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم ۴۰٪ افزایش پیدا می‌کند. همچنین در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد این میزان افزایش به ترتیب برای اتصال بدون عیب ۳۵٪ و ۱۸٪، برای اتصال دارای عیب در سرامیک ۵۴٪ و ۵٪ و برای اتصال دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم ۳۹٪ و ۴۲٪ می‌باشد. با مقایسه افزایش مقادیر پارامترهای خزشی، با توجه به سطوح در نظر گرفته‌شده برای تنش و دما، مشاهده می‌شود که اثر افزایش دما و افزایش سطح عیوب، بر شتاب‌گیری رفتار خزشی در سطح تنش ثابت به‌مراتب قوی‌تر از اثر افزایش سطح تنش در دمای ثابت است. دلیل اثر قوی افزایش دما بر رفتار خزشی چسب را باید در سازوکارهای مولکولی مرتبط با افزایش دما جستجو کرد. افت خواص مکانیکی چسب تحت تأثیر افزایش دما توسط محققان بسیاری [۱۵-۱۷] گزارش شده است. تأثیر دما بر خواص خزشی در بارگذاری برشی نیز توسط واسرمن و همکارانش [۱۸] گزارش شده بود که نشان می‌داد دما تأثیر زیادی بر خزش چسب دارد. در اثر اعمال کشش محوری به نمونه آزمایش، زنجیره‌های مولکولی چسب نسبت به حالت



شکل (۶): قرارگیری نمونه در داخل کوره گرمایی جهت انجام تست کشش و خزش

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمون کشش

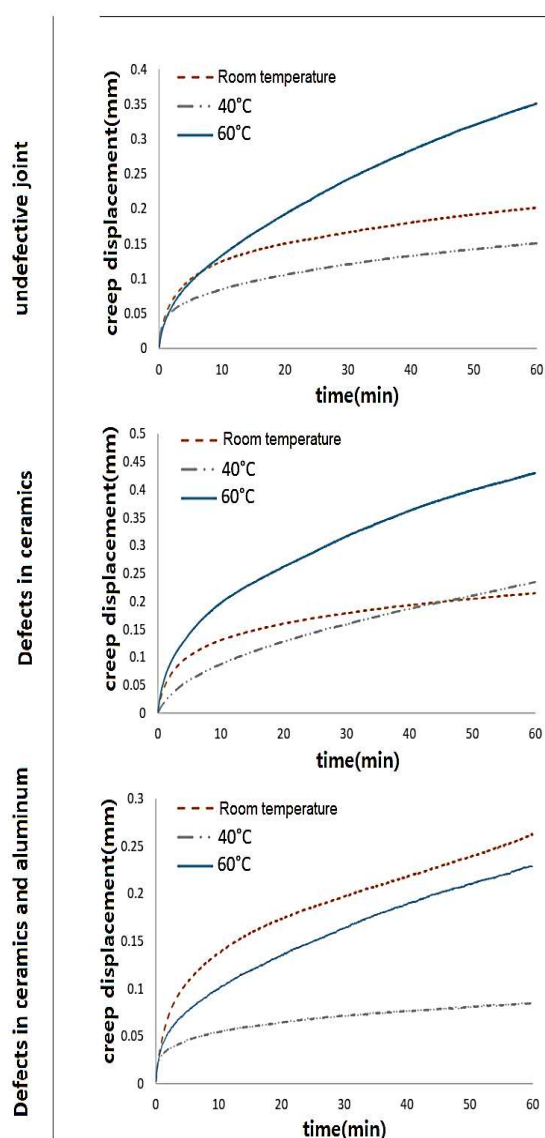
استحکام نهایی برشی اتصالات چسبی در سه حالت ساده، دارای عیب در سرامیک و دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم حاصل از انجام آزمایش کششی در سه دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش دما و افزایش سطح عیوب، استحکام برشی نهایی چسب نسبت به حالت بدون عیب ۹۰٪ کاهش می‌یابد؛ زیرا در دمای بالا و افزایش سطح عیوب، قسمت‌های بی‌نظم بستر چسب قابلیت حرکت پیدا کرده؛ لذا استحکام نهایی چسب به‌شدت افت پیدا می‌کند. با افزایش دما و جنبش مولکولی زنجیره‌های پلیمری، چسب رفتار نرم پیدا می‌کند. همچنین در اتصالات چسبی بدون عیب بالاترین ناحیه تمرکز تنش در لبه‌های انتهایی ناحیه اتصال بوده و شروع جدایش اتصال نیز از همین ناحیه خواهد بود.

جدول (۴): نتایج آزمون کشش اتصال تک‌لبه

دما (سانتی‌گراد)	استحکام برشی (MPa)		
	اتصال ساده	عیب در سرامیک	عیب در سرامیک و آلومینیوم
محیط	۱/۷	۱	۰/۶۶
۴۰	۱	۰/۹	۰/۰۴
۶۰	۰/۹	۰/۰۸	۰/۰۱

نیروی اعمالی در هر کدام از آزمون‌های خزش می‌باشد. بدین مفهوم که آزمون خزش برای هر دما با ۶۰ درصد مقدار نیروی شکست همان نمونه در همان دما اعمال گردیده است. از آنجایی که مقدار نیروی شکست نمونه در دماهای مختلف با افزایش دما کاهش می‌یابد (این مقادیر در جدول ۴ داده شده است)؛ لذا با توجه به متفاوت بودن نیروی اعمالی در آزمون خزش برای دماهای مختلف، امکان اینکه خزش در دمای ۴۰ درجه نسبت به خزش در دمای محیط کمتر باشد وجود دارد.

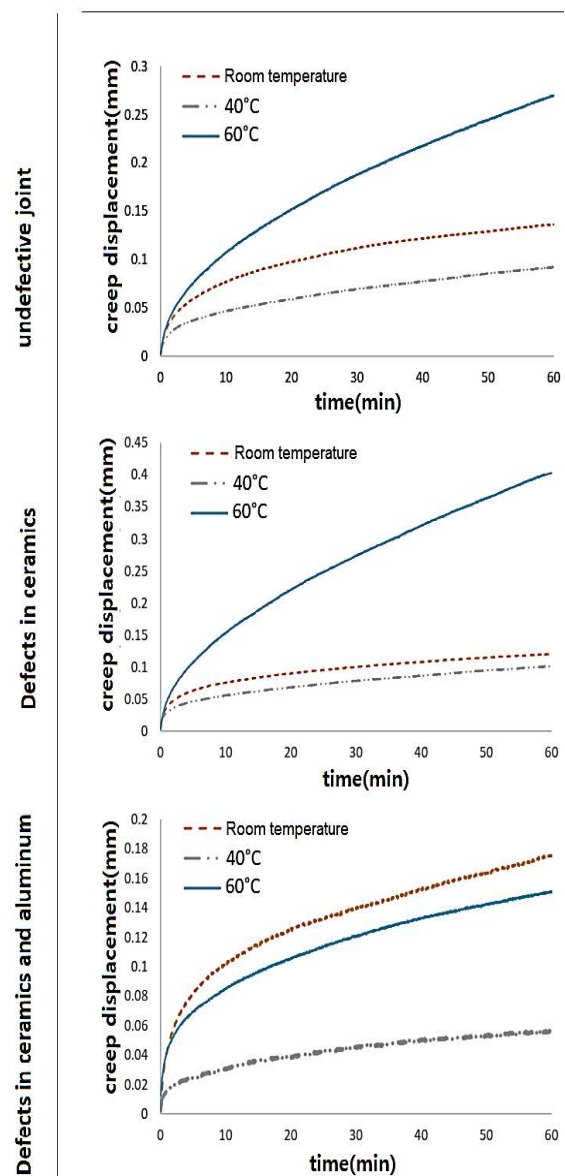
60%



شکل (۸): منحنی‌های کرنش برش خزشی در دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد با ۶۰ درصد نیروی کشش

اولیه کشیده شده و با جهت اعمال نیرو هم‌راستا می‌شوند. با افزایش دما از محیط به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، با کاهش سفتی زنجیره‌های پلیمری و افزایش نرم‌شدگی بستر چسب، تحرک زنجیره‌های پلیمری افزایش پیدا کرده که این رفتار با افزایش سطح تنش اعمالی شتاب بیشتری پیدا می‌کند.

40%



شکل (۷): منحنی‌های کرنش برش خزشی در دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد با ۴۰ درصد نیروی کشش

شایان ذکر است که با توجه به نمودارها تست روی نمونه‌های با عیب در سرامیک و فلز، جابه‌جایی خزشی بیشتری را ایجاد می‌نماید دلیل این مسئله متفاوت بودن

### ۳-۳- مدل خزشی نورتون-بیلی

کرنش خزشی در دمای ثابت تابعی از تنش  $\sigma$  و زمان  $t$  است، طبق رابطه (۱) می‌توان آن را محصول توابع تنش و زمان دانست.

$$\epsilon_{cr} = H(\sigma, t) = h_1(\sigma) \cdot h_2(t). \quad (1)$$

از تحلیل نتایج نمودارهای خزشی به کمک جعبه‌ابزار برازش منحنی مجموعه نرم‌افزارهای متلب، مناسب‌ترین معادله برای برازش داده‌ها خزشی به دست آمد. با استفاده از معادلات غیرخطی و برازش داده‌های تنش-کرنش خزشی مهندسی با مدل خزشی نورتون-بیلی، ثابت‌های  $B$ ،  $m$  و  $n$  در معادله (۲) تعیین شد،  $m$  و  $n$  اعداد بی‌بعد هستند و  $B$  دارای بعد  $[Pa^{-n} \cdot s^{-m}]$  است. مدل خزشی چسب در جداول ۵ تا ۷ به دست آمد. شکل ۹ تا ۱۱ نتایج مدل‌سازی خزشی رفتار چسب در دو حالت تنش ۴۰ و ۶۰ درصد استحکام نهایی چسب را برای سه دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. همچنین  $R^2$  نشان‌دهنده خطای میانگین مربعات در مجموعه نرم‌افزارهای متلب می‌باشد، هرچه قدر مقدار آن به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده بالاتر بودن میزان دقت برازش است.

$$\epsilon_{cr} = B \sigma^n t^m \quad (2)$$

جدول (۵): ثوابت تابع توانی نورتون-بیلی در دمای محیط

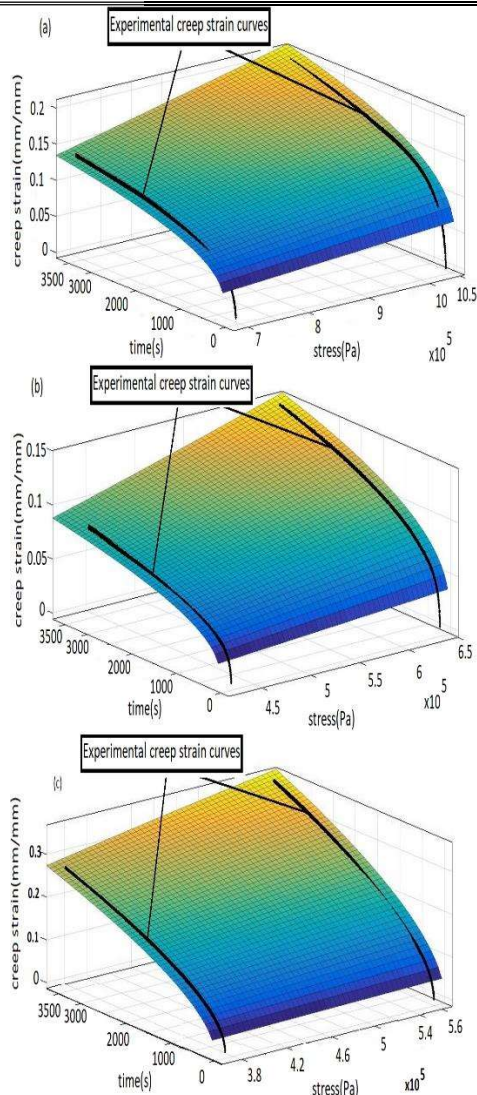
Bailey-Norton	$B \times 10^8$	m	n	$R^2$
خزش اتصال بدون عیب	۱/۴۷	۰/۳۰۰۹	۱/۰۰۹	۰/۹۹۴
خزش اتصال عیب در سرامیک	۰/۰۱۲۵	۰/۲۶۸۴	۱/۴۲۶	۰/۹۹۸۳
خزش اتصال عیب در سرامیک و آلومینیوم	۲۰/۴۹	۰/۳۴۲۲	۰/۸۶۹۹	۰/۹۹۴۴

جدول (۶): ثوابت تابع توانی نورتون-بیلی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

Bailey-Norton	$B \times 10^9$	m	n	$R^2$
خزش اتصال بدون عیب	۱/۱۵۳	۰/۳۵۱۹	۱/۱۷۹	۰/۹۹۸۵
خزش اتصال عیب در سرامیک	۰/۰۰۰۴۱۰۱	۰/۵۴۴۱	۱/۷۰۸	۰/۹۹۷۷
خزش اتصال عیب در سرامیک و آلومینیوم	۱۵/۲۵	۰/۲۴۷۹	۱/۱۰۵	۰/۹۹۵۶

جدول (۷): ثوابت تابع توانی نورتون-بیلی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

Bailey-Norton	$B \times 10^9$	m	n	$R^2$
خزش اتصال بدون عیب	۹۷۳/۳	۰/۵۳۱۳	۰/۶۳۸	۰/۹۹۹۵
خزش اتصال عیب در سرامیک	۱۴۵/۴	۰/۴۶۳۹	۰/۱۴۵۶	۰/۹۹۸۶
خزش اتصال عیب در سرامیک و آلومینیوم	۰/۰۰۵۹۲۸	۰/۵۰۲۵	۰/۹۸۵۶	۰/۹۶۳۹

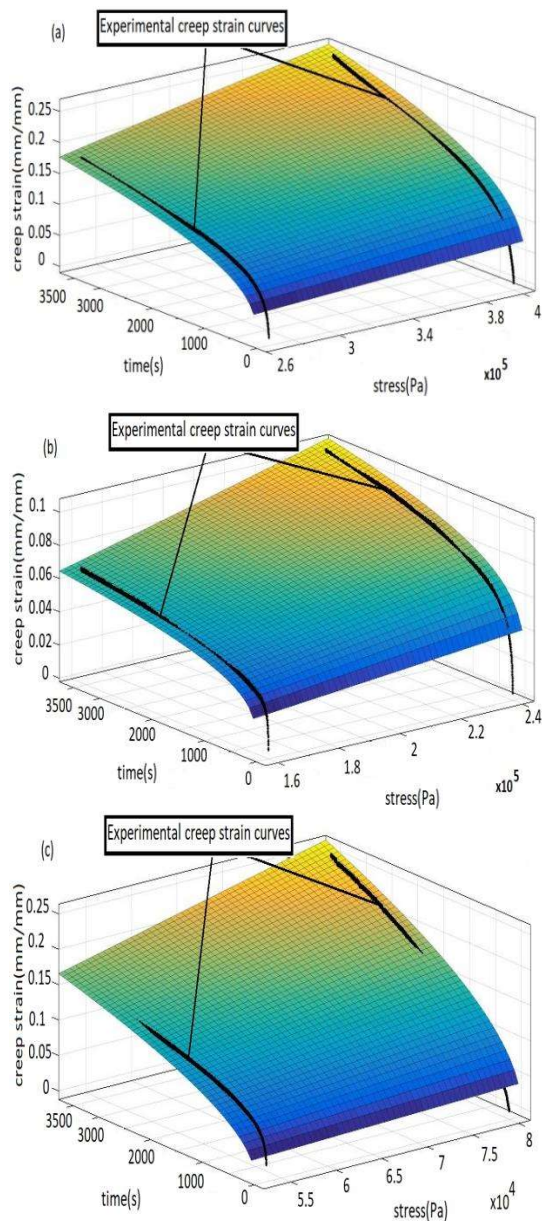


شکل (۹): نتایج آزمایش خزش در دو حالت تنش ۴۰ و ۶۰ درصد توسط رابطه بیلی-نورتون در دمای محیط برای سه نوع اتصال (a) بدون عیب، (b) عیب در سرامیک و (c) عیب در سرامیک و آلومینیوم



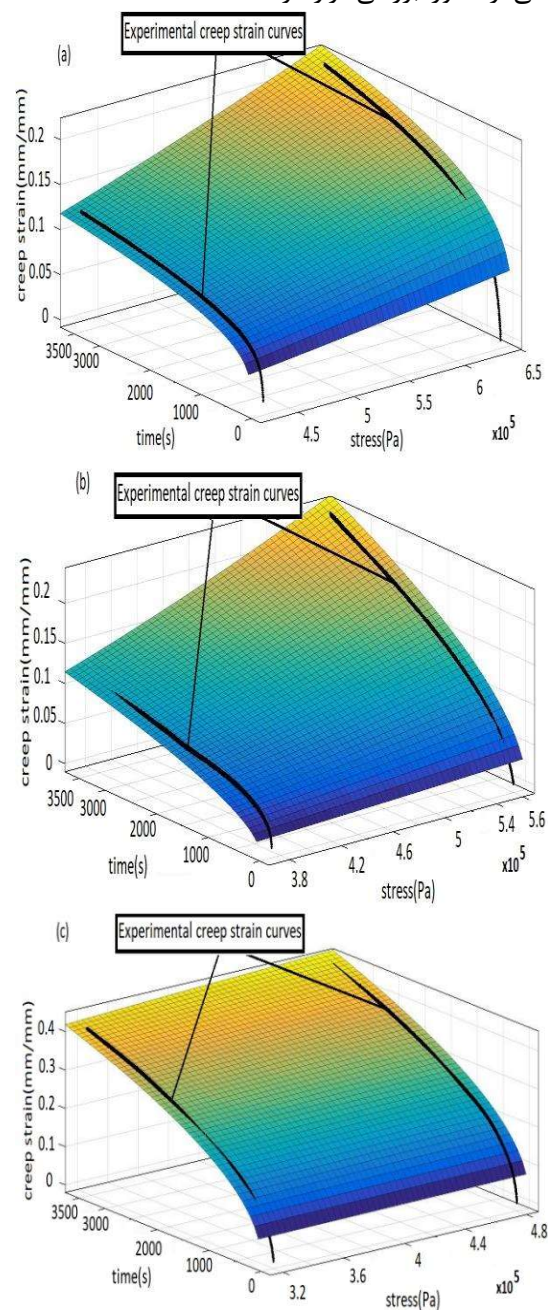
## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر دما و سطح تنش بر رفتار خزشی اتصالات چسبی تکلبه‌ای در دمای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۱۱): نتایج آزمایش خزش در دو حالت تنش ۴۰ و ۶۰ درصد توسط رابطه بیلی-نورتون در دمای ۶۰ سانتی‌گراد برای سه نوع اتصال (a بدون عیب، b عیب در سرامیک و c عیب در سرامیک و آلومینیوم

بدین منظور ابتدا آزمایش کشش اتصال تکلبه در سه دمای مورد نظر برای هر کدام از اتصالات صورت پذیرفت. سپس آزمایش خزش کششی روی اتصالات در دماهای محیط، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، در دو سطح تنش ۴۰ و ۶۰ درصد استحکام برشی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که در اتصالات چسبی بدون عیب بالاترین ناحیه تمرکز تنش در



شکل (۱۰): نتایج آزمایش خزش در دو حالت تنش ۴۰ و ۶۰ درصد توسط رابطه بیلی-نورتون در دمای ۴۰ سانتی‌گراد برای سه نوع اتصال (a بدون عیب، b عیب در سرامیک و c عیب در سرامیک و آلومینیوم

[5] da Silva LFM, Carbas RJC, Critchlow GW, Figueiredo MAV, Brown K. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009;29(6):621-32.

[6] da Silva LFM, Critchlow GW, Figueiredo MAV. Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2008;22(13):1477-94.

[7] da Silva LFM, Lopes MJCQ. Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009;29(5):509-14.

[8] Machado JJM, Gamarra PMR, Marques EAS, da Silva LFM. Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry. *Composite Structures*. 2018;185:373-80.

[9] Njuhovic E, Witt A, Kempf M, Wolff-Fabris F, Glöde S, Altstädt V. Influence of the composite surface structure on the peel strength of metallized carbon fibre-reinforced epoxy. *Surface and Coatings Technology*. 2013;232:319-25.

[10] Atikah N, Afendi M, Hirmaliza S, Abdul Majid MS, Amira N, Mohd Noor M. Strength of Ductile Adhesive Butt Joint Bonded with Dissimilar Adherents: Effect of Surface Roughness. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;554:366-70.

[11] Zehsaz M, Vakili-Tahami F, Saeimi-Sadigh M-A. Parametric study of the creep failure of double lap adhesively bonded joints. *Materials & Design*. 2014;64:520-6.

[12] Ashofteh RS, Khoramishad H. Investigation of the creep behavior of graphene oxide nanoplatelet-reinforced adhesively bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2019;33(6):561-78.

[13] Pisharody AP, Blandford B, Smith DE, Jack DA. An experimental investigation on the effect of adhesive distribution on strength of bonded joints. *Applied Adhesion Science*. 2019;7(1):6.

[14] Khabazaghdam A, Behjat B, Yazdani M, Da Silva LFM, Marques EAS, Shang X. Creep behaviour of a graphene-reinforced epoxy adhesively bonded joint: experimental and numerical investigation. *The Journal of Adhesion*. 2020:1-22.

[15] Petrie EM. *Handbook of Adhesive and Sealants*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 2007.

[16] Adams RD, Coppedale J, Mallick V, Al-Hamdan H. The effect of temperature on the

لبه‌های انتهایی ناحیه اتصال بوده و شروع جدایش اتصال نیز از همین ناحیه خواهد بود. در قطعات با اتصال معیوب شروع جدایش از ناحیه‌ای است که ایراد در آن ناحیه قرار داده شده و سپس رشد جدایش تا لبه ناحیه اتصال که دارای کمترین ناحیه تمرکز تنش می‌باشد ادامه می‌یابد، سپس باعث ایجاد شکست می‌گردد. افزایش سطح تنش و ایجاد عیوب در اتصال، منجر به تشدید رفتار خزشی ماده در دمای ثابت می‌شود. با افزایش سطح تنش از ۴۰ به ۶۰ درصد، جابه‌جایی خزشی در دمای محیط به ترتیب برای اتصال بدون عیب، عیب در سرامیک و عیوب در سرامیک و آلومینیوم برابر ۳۶٪، ۳۳٪ و ۴۰٪ افزایش پیدا کردند. همچنین در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد این میزان افزایش برای اتصال بدون عیب ۳۵٪ و ۱۸٪، برای اتصال دارای عیب در سرامیک ۵۴٪ و ۵٪ و برای اتصال دارای عیوب در سرامیک و آلومینیوم ۳۹٪ و ۴۲٪ می‌باشد. همچنین با استفاده از مجموعه نرم‌افزارهای تحلیلی ریاضی متلب فرمول مناسب برای نمودار خزشی به‌دست‌آمده از تست‌ها ارائه شد تا رفتار خزشی این نوع اتصالات را بتوان با نرم‌افزارهای تحلیلی پیش‌بینی کرد.

## ۵- مراجع

[1] Ashofteh RS, Pourang H, Mobasheri M, Khoramishad H. The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;5(3):353-8.

[2] Khoramishad H, Nasiri S. Investigation of the effect of material and geometrical parameters affecting the strength of hybrid adhesive-riveted joints. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2015;2(2):71-8.

[3] Shahrokhinasab S, Sahraeian R, Sabet A. Assessment of mixed adhesive in single lap and peel joint with composite substrate. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2017;4(2):189-94.

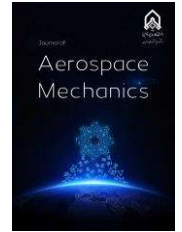
[4] Dadian A, Rahnama S, Zolfaghari A. Strength improvement of composite-steel lap joint by grading the joint area with carbon and glass fiber and also mechanical interference by reverse step. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2019;6(3):393-400.

strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1992;12(3):185-90.

[17] Adams RD, Mallick V. The Effect of Temperature on the Strength of Adhesively-Bonded Composite-Aluminium Joints. *The Journal of Adhesion*. 1993;43(1-2):17-33.

[18] Banea MD, da Silva LFM, Campilho RDSG. Effect of temperature on the shear strength of aluminium single lap bonded joints for high temperature applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014;28(14-15):1367-81.

[19] Wasserman S, Dodiuk H, Kenig S. Shear creep behaviour of elastomeric adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1992;12(4):257-61.



## Investigating the Effect of 2-D Defects on Tensile and Creep Behavior of Single-lap Ceramic-metal Adhesive Joints

**Bashir Behjat<sup>1\*</sup>, Farzad Rahnavard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> MSc, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

### HIGHLIGHTS

- By increasing the final stress-to-strength ratio from 0.40 to 0.60 at ambient temperature, the creep displacement for % for ceramics with more defections increases to 40%.
- As the temperature increases from ambient temperature to 60°C, the breaking force for the three types of connections is reduced by 46%, 25% and 80%.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 June 2021

Received in revised form: 29 August 2021

Accepted: 21 January 2022

Available online: 22 January 2022

\*Correspondence: behjat@sut.ac.ir

#### How to cite this article:

B. Behjat, F. Rahnavard. Investigating the effect of 2-d defects on tensile and creep behavior of single-lap ceramic-metal adhesive joints. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022; 18(2):67-78.

### ABSTRACT

Constant loading causes creep deformation in polymer-based adhesives due to their visco-elastic nature. The aim of this study was Investigating the effect of 2-D defects on tensile and creep behavior of single-lap ceramic-metal joints (SLJs) manufactured with adhesive Aqua-Flex. Static tensile test was performed at three ambient temperatures, 40°C and 60°C for flawless and defected adhesive joints in ceramics as well as defects in ceramics and aluminum, and then by applying final stress-to-strength ratios equal to 0.40 and 0.60, tensile creep test has been also performed. By increasing the final stress-to-strength ratio from 0.40 to 0.60 at ambient temperature, the creep displacement for flawless connection is 36%, this amount increases to 33% for defected ceramics and to 40% for ceramics with more defections. At 40°C and 60°C, respectively, this increase is 35% and 18% for defected connection, 54% and 5% for defected connection in ceramic and 39% and 42% for connection with defected connection in ceramic and aluminum. Also, as the temperature increases from ambient temperature to 60°C, the breaking force for the three types of connections is reduced by 46%, 25% and 80%.

#### Keywords:

Adhesive

Creep

Shear strength

Single-lap joint