

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه فنی و مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان

بررسی رفتار ویسکوالاستیک اتصال چسب تحت بار ثابت و متغیر در دمای بالا

استاد راهنما

دکتر محمد زهساز

استاد مشاور

دکتر فرید وکیلی تهامی

پژوهشگر

محمد علی صائیمی صدیق

مهر ماه ۹۳

نام خانوادگی: صائمی صدیق	نام: محمد علی
عنوان پایان نامه: بررسی رفتار ویسکوالاستیک اتصال چسب تحت بار ثابت و متغیر در دمای بالا	
استاد راهنما: دکتر محمد زهساز	استاد مشاور: دکتر وکیلی تهامی
مقطع تحصیلی: دکتری	رشته: مهندسی مکانیک
دانشگاه: دانشگاه تبریز	گرایش: طراحی کاربردی
تاریخ فارغ التحصیلی: ۹۳/۷/۱۷	دانشکده: فنی مهندسی مکانیک
تعداد صفحه: ۱۳۵	
کلید واژه: اتصالات چسبی آلومینیوم، خزش، المان محدود، تنشهای حرارتی	
<p><b>چکیده</b></p> <p>امروزه در بسیاری از زمینه‌های صنعتی می‌توان مثال‌های فراوانی از کاربردهای اتصالات چسبی مشاهده نمود. اتصالات چسبی در دهه گذشته به طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، هوافضا، سازه‌های تولید انرژی و سازه‌های ساختمانی بکار گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه همچنان طراحی اتصالات چسبی بیشتر براساس اطلاعات آزمایشگاهی و تجربی انجام می‌گیرد، لذا بایستی رفتار مکانیکی این اتصالات با انجام آزمایشات و ارائه مدل‌های تئوری دقیق‌تر مورد بررسی بیشتری قرار گیرد.</p> <p>در این پایان‌نامه به منظور بررسی رفتار ویسکوالاستیک اتصال چسبی در دمای محیط و دمای بالا، در قدم اول نمونه‌های حجمی چسب آرالدیت ۲۰۱۵ تهیه شده است. برای این منظور چسب دوجزئی مذکور در قالب‌هایی که از جنس سیلیکون و به ابعاد استاندارد برش داده شده ریخته‌گری شده است. سپس این نمونه‌ها در داخل کوره باز پخت شده و جهت انجام آزمایشات به منظور استخراج خواص مکانیکی آن مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌های حجمی تحت آزمایش کشش جهت بدست آوردن خواص مکانیکی همچون مدول یانگ، تنش تسلیم و تنش نهایی قرار گرفته است. به این ترتیب خواص مکانیکی بدست آمده چسب از آزمایش کشش ساده با مقادیر ارائه شده توسط سازنده مقایسه و صحت ساخت نمونه‌ها بررسی شده است. سپس این نمونه‌ها تحت آزمایش خزش کششی تک محوره با بار ثابت در دماهای ثابت مختلف قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این آزمایش جهت پیش‌بینی رفتار خزشی اتصال چسب بکار رفته است. برای این منظور مدل‌های سخت شونده‌گی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و مدلی بر اساس رفتار ویسکوالاستیک چسب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل ویسکوالاستیک ارائه شده در این تحقیق نسبت به مدل‌های موجود در نرم افزارهای المان محدود با دقت بیشتری رفتار خزشی چسب را در دماهای بالا شبیه‌سازی می‌کند. همچنین تاثیر هندسه اتصال بر عمر خزشی آن به روش تجربی و مدلسازی المان محدود بررسی شده است. هدف از این آزمایشات بالا بردن عمر خزشی اتصال چسب می‌باشد. در نهایت رفتار اتصال چسبی تحت آزمایش با بارهای متغیر مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن ارائه شده است.</p>	

## فهرست مطالب

۱۶	بررسی منابع
۱۷	فصل ۱
۱۷	پایه های نظری و پیشینه تحقیق
۱۸	۱-۱. مقدمه
۱۹	۲-۱. کاربرد اتصالات چسب در صنعت
۲۱	۱-۳-۱. خواص مکانیکی
۲۲	۲-۳-۱. طراحی اتصالات چسبی
۲۳	۳-۳-۱. چسب و فلز پایه
۲۴	۴-۱. اتصالات چسب و روشهای آزمایش
۲۵	۱-۴-۱. تست تنش-کرنش نمونه حجمی چسب
۲۵	۲-۴-۱. تست کشش و برش اتصال لب به لب
۲۶	۵-۱. تاریخچه تحلیل تنش در اتصالات چسبی
۳۷	۶-۱. مبانی چسبکاری
۳۹	۷-۱. مزایای اصلی اتصالات چسبی در مقایسه با اتصالات دیگر
۴۰	۸-۱. مزایا و معایب اتصالات چسبی
۴۳	۹-۱. مبانی تئوری چسبکاری
۴۳	۱-۹-۱. نیروهای جاذب سطحی و مقاومت داخلی
۴۳	۲-۹-۱. ساختار قطعه چسبکاری شده
۴۴	۳-۹-۱. تأثیرات مقاومت داخلی و جاذبه سطحی
۴۴	۴-۹-۱. چسبهای مصنوعی
۴۵	۵-۹-۱. انواع چسبهای مصنوعی
۴۶	۶-۹-۱. چسبهای مصنوعی
۴۶	۷-۹-۱. توزیع چسب روی سطوح کار
۴۷	۸-۹-۱. عملیات آماده سازی سطح
۴۷	۱-۸-۹-۱. چربی زدایی سطح کار
۴۸	۲-۸-۹-۱. آزمایش چربی زدایی

۴۸	..... ۹-۹-۱. آماده سازی مکانیکی
۴۸	..... ۱۰-۹-۱. آماده سازی شیمیایی سطوح
۴۹	..... ۱۱-۹-۱. انواع چسبها و عملیات چسبکاری
۵۲	..... ۱۲-۹-۱. ماشینکاری قطعات چسبکاری شده (عملیات تولید)
۵۲	..... ۱۳-۹-۱. جدا کردن قطعات چسبکاری شده
۵۳	..... ۱۴-۹-۱. تمرکز تنش در اتصالات چسبی
۵۳	..... ۱۵-۹-۱. تنشهای پسماند در پیوندهای چسبی
۵۴	..... ۱۶-۹-۱. ملاحظات طراحی در پیوندهای چسبی
۵۷	..... ۱۷-۹-۱. مکانیزم پیوندهای چسبی
۵۹	..... ۱۸-۹-۱. پارامترهای مهم در استحکام چسبها
۶۰	..... ۱۹-۹-۱. امکانات کنترل در چسبکاری فلزات ( روشهای آزمایش )
۶۴	..... <b>فصل ۲</b>
۶۴	..... بررسی تجربی رفتار خزشی چسب آرالدیت ۲۰۱۵
۶۵	..... ۱-۲. مقدمه
۶۵	..... ۲-۲. نتایج تجربی خواص مکانیکی چسب
۷۶	..... ۳-۲. بررسی رفتار وابسته به زمان مواد پلیمری
۷۷	..... ۴-۲. خزش
۷۸	..... ۱-۴-۲. خزش در پلاستیکها
۷۹	..... ۵-۲. ویسکوالاستیسیته خطی
۸۱	..... ۱-۵-۲. مدل بورگر
۸۲	..... ۲-۵-۲. مدل زنر
۸۳	..... ۶-۲. ویسکوالاستیسیته غیرخطی (خزش)
۸۴	..... ۷-۲. بررسی رفتار وابسته به زمان چسب آرالدیت ۲۰۱۵
۸۷	..... ۸-۲. بدست آوردن ضرایب معادلات خزش به روش بهینه سازی
۸۹	..... ۹-۲. نتایج برازش منحنی تابع توانی بیلی نورتون
۹۴	..... ۱۰-۲. مدل تجربی رفتار خزشی چسب
۹۹	..... <b>فصل ۳</b>

۹۹	.....بررسی تجربی و المان محدود رفتار اتصال دولبه چسب
۱۰۰	.....۱-۳- مقدمه
۱۰۱	.....۲-۳. آزمایش خزشی اتصال دو لبه
۱۰۱	.....۱-۲-۳. ساخت نمونه دولبه آزمایش خزش
۱۰۵	.....۲-۲-۳. مدلسازی المان محدود و صحت سنجی نتایج عددی
۱۰۸	.....۳-۲-۳. نتایج تحلیل تنش اتصال دو بعدی
۱۲۰	.....۳-۳. بررسی تاثیر پارامترهای هندسی در رفتار خزشی اتصال
۱۲۱	.....۱-۳-۳. بررسی تاثیر ضخامت
۱۲۵	.....۲-۳-۳. بررسی تاثیر فیلت
۱۳۳	.....۴-۳. بارگذاری متغیر اتصال دو لبه چسب
۱۳۸	.....۵-۳. بحث و نتیجه گیری

## فهرست شکلها

- شکل ۱-۱. محل کاربرد اتصالات چسب در هواپیما..... ۲۰
- شکل ۱-۲. رفتار وابسته به زمان منحنی تنش کرنش یک نمونه چسب اپوکسی ..... ۲۲
- شکل ۱-۳. تغییر خواص مکانیکی با دما یک نمونه چسب اپوکسی ..... ۲۲
- شکل ۱-۴. روشهای کاهش تنش در اتصال تک لبه ..... ۲۳
- شکل ۱-۵. کاربرد دو نوع چسب در اتصال تک لبه..... ۲۳
- شکل ۱-۶. جلوگیری از ایجاد تنش کششی ..... ۲۴
- شکل ۱-۷. نمونه تست کشش چسب ..... ۲۵
- شکل ۱-۸. تست کشش اتصال چسب ..... ۲۶
- شکل ۱-۹. اتصال چسب تحت بارهای برشی و کششی ..... ۲۶
- شکل ۱-۱۰. تغییر شکل اتصال تک لبه تحت بار کششی..... ۲۷
- شکل ۱-۱۱. مدل گولاند و رسنر..... ۲۸
- شکل ۱-۱۲. ترکیب المانهای فنر دمپر جهت مدلسازی رفتار ویسکو الاستیک..... ۳۴
- شکل ۱-۱۳. ترکیب فنر و دمپر بکار رفته توسط جهت مدلسازی رفتار چسب ..... ۳۶
- شکل ۱-۱۴. ترکیب فنر و دمپر بکار رفته توسط جهت مدلسازی رفتار چسب ..... ۳۷
- شکل ۱-۱۵. نیروهای جاذبه سطحی و مقاومت داخلی در قطره باران ..... ۴۳
- شکل ۱-۱۶. ساختار یک قطعه چسبکاری شده ..... ۴۴
- شکل ۱-۱۶. محلهای متعددی از یک خودروی جدید که چسب در آنها بکار رفته ..... ۵۴
- شکل ۲-۱. نمونه حجمی چسب جهت انجام تست کشش (ابعاد به میلیمتر)..... ۶۵
- شکل ۲-۲-الف. ریخته گری نمونه در داخل ورق سیلیکون ..... ۶۶
- شکل ۲-۲-ب. پخت نمونه چسب در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد..... ۶۶
- شکل ۲-۳. آزمایش کشش نمونه چسب..... ۶۷
- شکل ۲-۴. نمودار تنش کرنش نمونه چسب..... ۶۷
- شکل ۲-۵. آزمایش کشش اتصال چسبی آلومینیوم..... ۶۸
- شکل ۲-۶. نمودار نیرو تغییر طول اتصال چسب..... ۶۹
- شکل ۲-۷-الف و ب). دستگاه تست خزش تک محوره ..... ۷۰

- شکل ۸-۲. نمودار تغییر طول نمونه چسب طی آزمایش خزش تک محوره در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.....۷۲
- شکل ۹-۲. نمودار تغییر طول نمونه چسب طی آزمایش خزش تک محوره در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد.....۷۲
- شکل ۱۰-۲. نمودار تغییر طول نمونه چسب طی آزمایش خزش تک محوره در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد...۷۳
- شکل ۱۱-۲. نمودار تغییر طول نمونه چسب طی آزمایش خزش تک محوره در دمای ۶۳ درجه سانتیگراد.....۷۳
- شکل ۱۲-۲. سطح مقطع شکست یک نمونه چسب در اثر وجود حباب و عدم اختلاط صحیح الف) با بزرگنمایی ۵۰X ب) بزرگنمایی 135x .....۷۴
- شکل ۱۳-۲. سطح مقطع شکست یک نمونه چسب با اختلاط صحیح الف) با بزرگنمایی ۱۵۰X ب) بزرگنمایی 505x .....۷۵
- شکل ۱۵-۲. نمودار خزش در مواد .....۷۷
- شکل ۱۶-۲. الف: مدل ماکسول ب: نمودار کرنش زمان تحت تنش ثابت ج: نمودار رهایش تنش تحت کرنش ثابت [۴۱].....۷۹
- شکل ۱۷-۲. الف: مدل کلوین ب: نمودار کرنش زمان تحت کرنش ثابت ج: نمودار رهایش تنش تحت .....۸۱
- تنش ثابت .....۸۱
- شکل ۱۸-۲. مدل بورگر.....۸۲
- شکل ۱۹-۲. مدل زنر .....۸۲
- شکل ۲۰-۲: نحوه بدست آوردن نمودار ایزوکرونوس .....۸۶
- شکل ۲۱-۲. نمودار ایزوکرونوس چسب آرالدیت ۲۰۱۵ در دمای محیط.....۸۷
- شکل ۲۲-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه بیلی نورتون در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.....۹۰
- شکل ۲۳-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه بیلی نورتون در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد.....۹۱
- شکل ۲۴-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه بیلی نورتون در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد.....۹۱
- شکل ۲۵-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه تعمیم یافته سخت شوندهگی زمانی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.....۹۳
- شکل ۲۶-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه تعمیم یافته سخت شوندهگی زمانی در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد.....۹۳
- شکل ۲۷-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیشبینی شده توسط رابطه تعمیم یافته سخت شوندهگی زمانی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد.....۹۳



- شکل ۲-۲۸. مدل رهولوژی به صورت ترکیبی از مدل‌های ماکسول و زنر..... ۹۴
- شکل ۲-۲۹. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه مدل رهولوژی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۹۷
- شکل ۲-۳۰. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه مدل رهولوژی در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۹۸
- شکل ۲-۳۱. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه مدل رهولوژی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد..... ۹۸
- شکل ۳-۱- آماده سازی نمونه‌های تست خزش..... ۱۰۱
- شکل ۳-۲. آماده سازی نمونه اتصال چسب..... ۱۰۲
- شکل ۳-۳-الف) قرار دادن نمونه در فیکسچر ب) قرار دادن نمونه در فیکسچر جهت همراهی سازی ج) قرار دادن نمونه در فیکسچر جهت ایجاد ضخامت..... ۱۰۳
- شکل ۳-۴. قرار دادن مجموعه در داخل کوره..... ۱۰۴
- شکل ۳-۶. الف) ابعاد اتصال دو لبه چسب به همراه شرایط مرزی اعمال شده ب) قسمتی از مدل المان بندی شده..... ۱۰۶
- شکل ۳-۷. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش اتصال دو لبه در دمایی ۵۵ درجه سانتیگراد و نتایج حاصل از شبیه سازی المان محدود..... ۱۰۷
- شکل ۳-۸. مسیری در وسط ضخامت چسب (خط AB) در امتداد محور X..... ۱۰۹
- شکل ۳-۹. نمودار تنش  $S_x$  برای اتصال دو لبه چسب در مسیر AB در دمای محیط در زمان اعمال بار کششی و پس از طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $25^\circ C$ ..... ۱۰۹
- شکل ۳-۱۰. کانتور توزیع تنش کشش  $S_x$  در مقطع اتصال بالا..... ۱۰۹
- شکل ۳-۱۱. تغییرات تنش عمودی  $S_y$  ایجاد شده در مسیر AB از چسب طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $25^\circ C$ ..... ۱۱۰
- شکل ۳-۱۲. کانتور تغییر شکل اتصال دولبه تحت کشش با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر..... ۱۱۰
- شکل ۳-۱۳. تغییرات تنش برشی  $S_{xy}$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $25^\circ C$ ..... ۱۱۱
- شکل ۳-۱۴. تغییرات تنش  $S_x$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $40^\circ C$ ..... ۱۱۲
- شکل ۳-۱۵. تغییرات تنش  $S_x$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $55^\circ C$ ..... ۱۱۲
- شکل ۳-۱۶. تغییرات تنش عمودی  $S_y$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $40^\circ C$ ..... ۱۱۳
- شکل ۳-۱۷. تغییرات تنش عمودی  $S_y$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $10^6$  ثانیه در دمای  $55^\circ C$ ..... ۱۱۳

- شکل ۳-۱۸. تغییرات تنش برشی  $S_{xy}$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $40^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۴
- شکل ۳-۱۹. تغییرات تنش برشی  $S_{xy}$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $55^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۴
- شکل ۳-۲۰. تغییرات تنش ون-میسس در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۵
- شکل ۳-۲۱. تغییرات تنش ون-میسس در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $40^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۵
- شکل ۳-۲۲. تغییرات تنش ون-میسس در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $55^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۶
- شکل ۳-۲۳. تغییرات کرنش عمودی  $\epsilon_y$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۷
- شکل ۲-۲۴. تغییرات کرنش عمودی  $\epsilon_y$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $40^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۷
- شکل ۳-۲۵. تغییرات کرنش عمودی  $\epsilon_y$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $55^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۸
- شکل ۳-۲۶. تغییرات کرنش برشی  $\epsilon_{xy}$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۸
- شکل ۳-۲۷. تغییرات کرنش برشی  $\epsilon_{xy}$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $40^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۹
- شکل ۳-۲۸. تغییرات کرنش برشی  $\epsilon_{xy}$  در مسیر AB از چسب طی زمان  $۱۰^۶$  ثانیه در دمای  $55^{\circ}\text{C}$ ..... ۱۱۹
- شکل ۳-۲۹. رفتار خزشی چسب در دمای  $۶۳$  درجه سانتیگراد..... ۱۲۱
- شکل ۳-۳۰. نمونه اتصال دو لبه چسب که در آزمایش خزش دچار شکست شده ..... ۱۲۲
- شکل ۳-۳۱. نمودار تغییر طول ایجاد شده در نمونه پس از اعمال بار حرارتی  $۶۳$  درجه سانتیگراد و بار  $۴۱۰$  نیوتن..... ۱۲۳
- شکل ۳-۳۲. نمودار تغییر طول ایجاد شده در نمونه پس از اعمال بار حرارتی  $۶۳$  درجه سانتیگراد و بار  $۵۱۰$  نیوتن..... ۱۲۳
- شکل ۳-۳۳. مقایسه تنش ون-میسس در لحظه شکست اتصال تحت بار  $410\text{N}$ ..... ۱۲۴
- شکل ۳-۳۴. مقایسه تنش برشی در لحظه شکست اتصال تحت بار  $410\text{N}$ ..... ۱۲۵
- شکل ۳-۳۵. مقایسه تنش جدایش در لحظه شکست اتصال تحت بار  $410\text{N}$ ..... ۱۲۵
- شکل ۳-۳۶. ابعاد هندسی اتصال دولبه..... ۱۲۶
- شکل ۳-۳۷. نمونه بکار رفته در تست خزش ..... ۱۲۶
- شکل ۳-۳۸. نمودار تغییر طول و زمان شکست اتصال دولبه نمونههای فیلتدار و بدون فیلت چسب تحت بار  $۴۱۰$  نیوتن ..... ۱۲۷
- شکل ۳-۳۹. نمودار تغییر طول و زمان شکست اتصال دولبه نمونههای فیلتدار و بدون فیلت چسب تحت بار  $۵۱۰$  نیوتن ..... ۱۲۷
- شکل ۳-۴۰. نمودار تنش ون-میسس ناشی از باگذاری حرارتی در دمای  $۶۳$  درجه سانتیگراد در مسیر AB برای نمونه فیلتدار و بدون فیلت ..... ۱۲۹

- شکل ۳-۴۱. کانتورهای تنش چسب در نمونه‌های بدون فیلر و فیلتردار..... ۱۲۹
- شکل ۳-۴۲. نمودار تنش  $S_x$  ناشی از باگذاری حرارتی در مسیر AB برای نمونه فیلتردار و بدون فیلر..... ۱۳۰
- شکل ۳-۴۳. نمودار تنش جدایش  $S_y$  ناشی از باگذاری حرارتی در مسیر AB برای نمونه فیلتردار و بدون فیلر..... ۱۳۱
- شکل ۳-۴۴. نمودار تنش ون-میسس را پس از اعمال بار مکانیکی در مسیر AB برای نمونه فیلتردار و بدون فیلر..... ۱۳۱
- شکل ۳-۴۵. نمودار تنش ون-میسس را در لحظه شکست در مسیر AB برای نمونه فیلتردار و بدون فیلر..... ۱۳۲
- شکل ۳-۴۶. نتایج آزمایشات اتصال چسبی جهت مقایسه تاثیر ضخامت لایه چسب و اعمال فیلر در طول عمر اتصال..... ۱۳۳
- شکل ۳-۴۷. اندازه‌گیری تغییر طول نمونه طی آزمایش خزش با بار متغیر..... ۱۳۴
- شکل ۳-۴۸. روش اعمال بار تناوبی به طور شماتیک..... ۱۳۴
- شکل ۳-۴۹. مقایسه نمودار تغییرات طول نمونه آزمایش شده تحت آزمایش خزش با بار تناوبی ( $t_h=1200$  sec) و خزش یکنواخت..... ۱۳۵
- شکل ۳-۵۰. مقایسه نمودار تغییرات طول نمونه آزمایش شده تحت آزمایش خزش با بار تناوبی ( $t_h=600$  sec) و خزش یکنواخت..... ۱۳۶
- شکل ۳-۵۱. مقایسه نمودار تغییرات طول نمونه آزمایش شده تحت آزمایش خزش با بار تناوبی ( $t_h=300$  sec) و خزش یکنواخت..... ۱۳۷
- شکل ۳-۵۲. مقایسه عمر نمونه‌های آزمایش شده تحت بارگذاری تناوبی و خزش یکنواخت..... ۱۳۸

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲. خواص مکانیکی چسب آرالدیت ۲۰۱۵.....۶۹
- جدول ۲-۲. ثوابت تابع توانی.....۹۰
- جدول ۳-۲. ثوابت تابع تعمیم یافته سخت شوندهگی زمانی.....۹۲
- جدول ۴-۲. مقادیر پارامترهای رابطه ۲-۴۰ حاصل از برازش منحنی برای آزمایشات انجام گرفته در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.....۹۶
- جدول ۵-۲. مقادیر پارامترهای معادله ۲-۴۱ را برای نتایج حاصل از آزمایش تک محوره خزش چسب در دمای ۲۵، ۴۰ و ۵۵ درجه.....۹۶
- جدول ۱-۳. آزمایشات انجام گرفته جهت بررسی تاثیر پارامترهای هندسی.....۱۲۰
- جدول ۲-۳. پارامترهای معادله ساختاری چسب را در دمای ۶۳ درجه سانتیگراد.....۱۲۱
- جدول ۳-۳. بررسی تاثیر ضخامت بر عمر اتصال.....۱۲۳
- جدول ۴-۳. بررسی تاثیر ضخامت بر عمر اتصال.....۱۲۷

## فهرست نمادها

$A$	ثابت وابسته به جنس در معادله بیلی نورتون
$B$	ثابت وابسته به جنس در معادله خزش
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$	ثوابت وابسته به جنس در معادلات خزش
$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$	ثوابت وابسته به جنس در معادله تعمیم یافته توانی خزش
$E$	مدول الاستیسیته
$E_0$	پارامتر وابسته به جنس
$E_1$	مدول الاستیسیته در معادلات ویسکوالاستیک
$E_2$	مدول الاستیسیته رهایی از تنش
$G_0$	پارامتر وابسته به جنس
$G_\infty$	پارامتر وابسته به جنس
$T$	دما
$T_0$	پارامتر وابسته به جنس
$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$	ثابتهای مواد در مدل رهولوژی
$b$	عرض اتصال
$c$	نصف طول اتصال
$l$	طول اتصال
$l_0$	طول اولیه اتصال
$m$	پارامتر وابسته به جنس در مدل توانی خزش
$n$	پارامتر وابسته به جنس در مدل توانی خزش
$p$	نیروی اعمالی در واحد طول
$t$	زمان
$t_a$	ضخامت چسب
$t_s$	پارامتر وابسته به جنس در مدل بورگر

## فهرست نمادها

$\varepsilon_c$	کرنش خزشی
$\varepsilon_e$	کرنش الاستیک
$\varepsilon_s$	کرنش حالت پایدار
$\eta_1$ و $\eta_2$	ضرایب ویسکوزیته دینامیک
$\nu$	نسبت پواسون
$\sigma$	تنش

امروزه در بسیاری از زمینه‌های صنعتی می‌توان مثال‌های فراوانی از کاربردهای اتصالات چسبی مشاهده نمود. اتصالات چسبی در دهه گذشته به طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، هوافضا، سازه‌های تولید انرژی و سازه‌های ساختمانی بکار گرفته شده‌اند. پیشرفت‌های صورت گرفته در تکنولوژی ساخت و تولید، همچنین ملاحظات زیست محیطی و نیاز به تولید در حجم انبوه سبب گسترش روزافزون کاربرد این نوع اتصالات گشته است. امروزه اتصالات چسبی در حال جایگزین شدن با انواع اتصالات قدیمی مانند اتصالات جوش، پیچ و پرچ می‌باشند. این امر به دلیل توزیع بهتر بار در اتصالات به دلیل نبود تمرکز تنش و تنش‌های پسماند، طول عمر مفید بالا، نیاز به ماشین‌کاری کمتر و سادگی مونتاژ قطعات می‌باشد. البته انتخاب صحیح چسب برای یک کاربرد خاص و محدودیت مقاومت اتصالات چسبی تحت بارهای استاتیکی و نوسانی باید در طراحی هر نوع اتصال چسبی مد نظر قرار گیرد. علاوه بر اینها، تاثیرات محیطی و ویژگی‌های ساختار چسب نقش مهمی در کارکرد صحیح اتصال دارد. برای مثال رفتار اتصالات چسبی در دماهای بالا و یا رطوبت بالا با رفتار آنها در شرایط دمای محیط و هوای خشک متفاوت است. پیشرفت‌های صورت گرفته در ساخت انواع چسب‌ها سبب شده تا امکان کاربرد این نوع اتصالات در گستره دمایی ۵۵- الی ۲۰۰ درجه سانتیگراد را تحمل کنند.

موضوع اصلی این پایاننامه بررسی رفتار ویسکوالاستیک اتصال دو لبه چسب تحت بار ثابت در دمای محیط و دمای بالا بوده و همچنین تاثیر بار متغیر بر عمر اتصال به روش تجربی بررسی شده است.

### دست آوردهای کلی:

- ۱- معرفی مدل‌ها سختی شوندگی مختلف جهت مدلسازی رفتار خزشی چسب
- ۲- کاربرد مدل‌های معرفی شده جهت مدلسازی رفتار خزشی اتصال چسبی ۲-
- ۳- بررسی تاثیر پارامترهای هندسی اتصال چسب بر رفتار خزشی اتصال چسب

### دست آوردهای محاسباتی به طور خاص:

- ۱- ارائه مدل سختی شوندگی ویژه جهت مدلسازی رفتار خزشی در دماهای مختلف
- ۲- کاربرد روش المان محدود جهت مدلسازی رفتار اتصال چسب
- ۳- بررسی دقت کاربرد مدل سختی شوندگی به دست آمده از نمونه حجمی چسب جهت پیش‌بینی رفتار خزشی اتصال چسبی

به منظور رسیدن به این اهداف، در قدم اول نمونه‌های حجمی چسب آرالدیت ۲۰۱۵ تهیه شده است. برای این منظور چسب دوجزئی مذکور در قالب‌های که از جنس سیلیکون و به ابعاد استاندارد برش داده شده

ریخته‌گری شده است. سپس این نمونه‌ها در داخل کوره باز پخت شده و جهت انجام آزمایشات به منظور استخراج خواص مکانیکی آن مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌های حجمی تحت آزمایش کشش جهت بدست آوردن خواص مکانیکی همچون مدول یانگ، تنش تسلیم و تنش نهایی قرار گرفته است. به این ترتیب خواص مکانیکی بدست آمده چسب از آزمایش کشش ساده با مقادیر ارائه شده توسط سازنده مقایسه و صحت ساخت نمونه‌ها بررسی شده است. سپس این نمونه‌ها تحت آزمایش خزش کششی تک محوره با بار ثابت در دماهای ثابت مختلف قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این آزمایش جهت پیش بینی رفتار خزشی اتصال چسب بکار رفته است. برای این منظور مدل‌های سختی شونده‌گی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و مدلی بر اساس رفتار ویسکوالاستیک چسب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که، مدل ویسکوالاستیک ارائه شده در این تحقیق نسبت به مدل‌های موجود با دقت بیشتری رفتار خزشی چسب را در دماهای بالا شبیه سازی می‌کند. همچنین تاثیر هندسه اتصال بر عمر خزشی آن به روش تجربی و مدلسازی المان محدود بررسی شده است. هدف از این آزمایشات بالا بردن عمر خزشی اتصال چسب می باشد. در نهایت رفتار اتصال چسبی تحت آزمایش با بارهای نوسانی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن ارائه شده است.



## فصل ۱

### پایه‌های نظری و پیشینه تحقیق

استفاده از چسبها امکانات جدیدی را در طراحی ایجاد کرده است. به علت عدم نیاز به ایجاد سوراخ، موجب می شود اتصال با نقطه ضعف کمتر از دیدگاه تمرکز تنش و خستگی ایجاد می شود. اتصالات چسبی که به خوبی طراحی شده اند بایستی به اندازه قطعات اتصالی استحکام داشته باشند [۱]. یک اتصال ایده آل آن است که شکست در خارج از منطقه پیوند صورت پذیرد. اگر شکست در لایه چسب رخ دهد نشانگر ضعف استحکام چسب به علت خواص پلیمری آن و نه قابلیت آن در پیوند با قطعه مورد نظر می باشد. کاربرد ضرایب اطمینان برای استحکام چسبها هنوز بصورت استاندارد تدوین نشده است، اگرچه در عمل بیشترین تنش وارده را ۱۰ تا ۲۰ درصد استحکام چسب در نظر می گیرند. حتی بکارگیری چنین ضرایب اطمینان بزرگی می تواند در شرایطی مرکب از عوامل محیطی، دمایی و زمانی ناکافی باشد. چنانچه عمر طولانی برای قطعه در نظر باشد، داشتن درک صحیحی از مکانیزمهای درونی افت کیفیت پیوندهای چسبی الزامی است.

در این پایان نامه رفتار ویسکوالاستیک اتصالات چسبی در دمای محیط و دمای بالا (۲۵ الی ۶۳ درجه سانتیگراد) مورد مطالعه قرار می گیرد. هدف از این تحقیق ابتدا بررسی رفتار وابسته به زمان چسب از طریق آزمایش خزش و بدست آوردن معادله ساختاری مناسب جهت مدلسازی چسب در دمای محیط و دمای بالا می باشد. سپس رفتار وابسته به زمان اتصال چسب به صورت آزمایشی مورد مطالعه قرار می گیرد. رفتار اتصال چسبی با استفاده از معادله ساختاری بدست آمده در بخش قبل به روش عددی مدلسازی شده و نتایج آن با نتایج بدست آمده از آزمایش مقایسه می شود. همچنین تاثیر افزایش و کاهش ضخامت لایه چسب و قرار دادن فیلت در محل اتصال در افزایش یا کاهش عمر اتصال مورد بررسی قرار می گیرد. قابل ذکر است که آزمایشات و تحلیل های خزش در محدوده تنش پایین تر از حد تسلیم چسب انجام می گیرد. در مرحله بعد اتصال چسب تحت بارگذاری خزش با بارهای متغیر قرار گرفته است و تاثیر بارگذاری متغیر بر عمر اتصال چسبی در مقایسه با اتصال تحت بار خزشی بررسی شده است.

## ۲-۱. کاربرد اتصالات چسب در صنعت

از کاربردهای وسیع چسب در صنعت می‌توان به کاربرد آن در سیستم‌های حمل نقل زمینی، دریایی و هوایی اشاره کرد. در سیستم حمل و نقل مقدار زیادی انرژی صرف غلبه بر وزن و استهلاک قطعات وسایل نقلیه می‌گردد. اصلاح اتصالات از طریق کاربرد چسب را می‌توان به عنوان یک راه کار جهت کاهش وزن مطرح نمود. البته اتصالات چسبی بسته به مواد و روشهای طراحی مهندسی بکار رفته باید ویژگی‌های خاصی را برآورده کنند. فاکتورهای مهم برای انتخاب چسبها شامل زمینه‌های مختلف کارکرد، قابلیت اطمینان از کیفیت (عمر سرویس دهی مناسب)، محافظت در برابر آتش‌سوزی، ضربه و غیره می‌باشد.

مهمترین کاربرد اتصالات چسب، در صنعت ساخت هواپیما می‌باشد. در صنعت ساخت هواپیما با سازه‌های فلزی در صورت استفاده از اتصالات چسبی به جای پیچ و پرچ ۱۰ الی ۱۵ درصد از وزن هواپیما کاهش می‌یابد [۲]. در هواپیماهای مسافری این مقدار برابر ۴ تن است که مقدار قابل توجهی می‌باشد. لذا توسعه روش‌های ساده آماده سازی سطح برای اتصال چسبی و روش‌های اتوماتیک اتصال چسب با استفاده از چسب‌های سرد<sup>۱</sup> که نیاز به پخت ندارند در صنایع هواپیماسازی از زمینه‌های مهم تحقیقات آینده می‌باشد. از مزایای کاربرد چسب در صنایع ساخت هواپیما می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- کیفیت سطح آیرودینامیکی بالای اتصالات به دلیل ایجاد منحنی‌های هموار و با دقت بالا.

۲- به دلیل توزیع مناسب بار در اتصال و عدم وجود تمرکز تنش ناشی از وجود ناپیوستگی<sup>۲</sup>، این اتصالات مقاومت بیشتری در برابر شکست و خستگی از خود نشان می‌دهند. همچنین خاصیت ارتعاش میرایی چسب سبب بهبود عمر خستگی ناشی از ارتعاشات موتور می‌شود.

۳- سهولت اتصال مواد با جنس‌های متفاوت با استفاده از چسب.

۴- سادگی ساخت سازه‌های ساندویچی از طریق کاربرد مواد سبکتر در هسته و ورق‌های فلزی در سطح

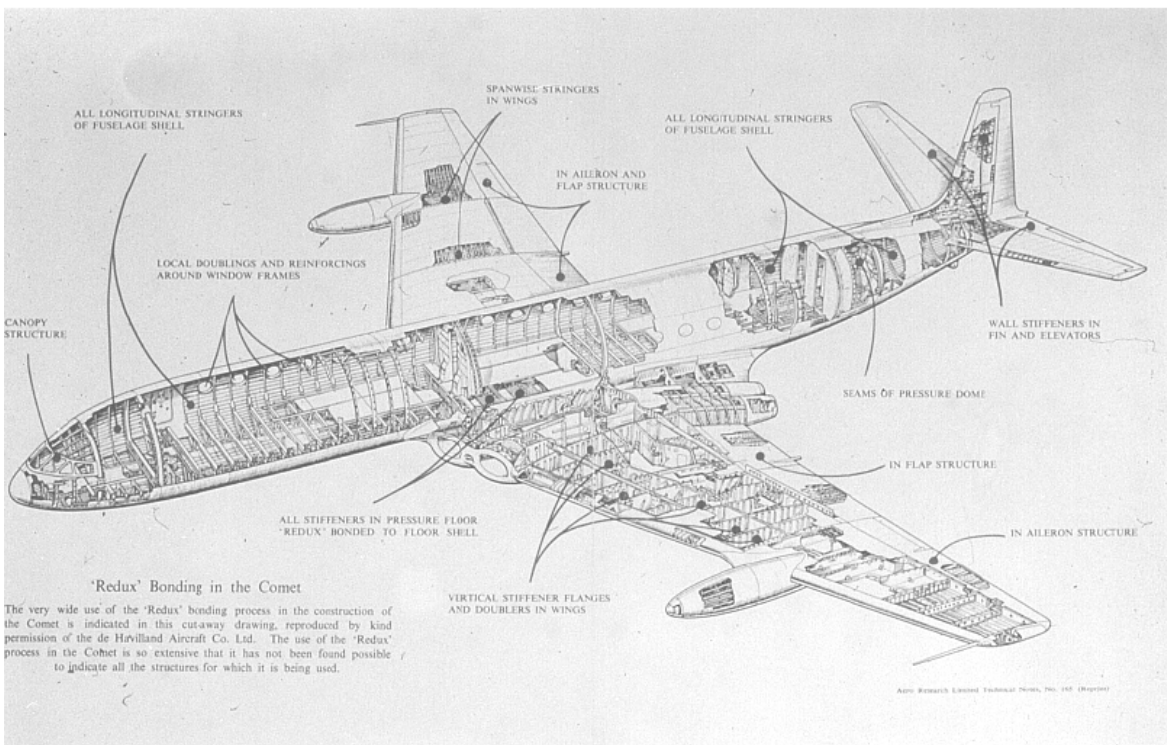
خارجی

---

<sup>1</sup> Cold setting

<sup>2</sup> Notch

چسب‌هایی که در صنعت ساختن هواپیما بکار می‌روند عمدتاً از نوع فنولیک رزین<sup>۳</sup> هستند که امروزه به شکل پیش‌ساخته و تقویت شده بکار می‌روند. در محیط‌هایی با دمای بیشتر مواد دیگری مانند رزین‌های پلی‌سولفون<sup>۴</sup> بکار می‌روند. همچنین از پلی‌آمیدها برای کاربرد در محیط‌هایی با دمای کم استفاده می‌شود. به جز اتصالات طولی در هواپیماهای فوکر چسب‌های سرد هنوز در صنعت هوافضا بکار گرفته نشده‌اند. اما در آینده این چسب‌ها به همراه فیبرهای کربن تقویت شده به طور گسترده‌ای در این صنعت بکار خواهند رفت. اتصالات چسبی بیشتر به منظور اتصال تراورس‌های عمودی به بدنه هواپیما و سطح بال‌های آن به منظور مقاوم‌سازی آنها و جلوگیری از کماتش سازه بکار می‌روند. شکل ۱-۱ محل کاربرد اتصالات چسب در هواپیما را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱. محل کاربرد اتصالات چسب در هواپیما [۳]

هواپیماهای مافوق صوت به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در محدوده دمایی ۵۰- الی ۳۳۸ درجه سانتیگراد پرواز کنند [۳]. برای مثال زمانی که هواپیما در ماخ 2.7 و بالاتر پرواز می‌کند به دلیل اصطکاک ایجاد شده

<sup>3</sup> Phenolic-Resin

<sup>4</sup> Polysulfone-Resin