

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان

**مطالعه اثر نیروی محوری پیچ بر روی عمر خستگی اتصالات مرکب (پیچ / چسب) دو
لبه برشی**

اساتید راهنما

دکتر محمد زهساز، دکتر تاج بخش نوید چاخارلو

استاد مشاور

دکتر سوران حسنی فرد

پژوهشگر

فیروز اسماعیلی گلدرق

مهر ۱۳۹۳

نام خانوادگی دانشجو: اسماعیلی گلدرق	نام: فیروز
عنوان پایان‌نامه: مطالعه اثر نیروی محوری پیچ بر روی عمر خستگی اتصالات مرکب (پیچ/چسب) دو لبه برشی	
اساتید راهنما: دکتر محمد زهساز، دکتر تاج بخش نوید چاخارلو استاد مشاور: دکتر سوران حسنی فرد	
مقطع تحصیلی: دکتری تخصصی رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: تبریز دانشکده: فنی مهندسی مکانیک	
تاریخ فارغ التحصیلی: مهر ۱۳۹۳	تعداد صفحه: ۱۲۱
کلید واژه‌ها: اتصال پیچ، اتصال مرکب، نیروی پیش‌بار، خستگی، المان محدود	
<p>چکیده:</p> <p>هدف کلی در این پایان‌نامه مطالعه اثر نیروی محوری پیچ بر روی عمر خستگی اتصالات مرکب (پیچ-چسب) دو لبه برشی به روش تجربی و عددی می‌باشد.</p> <p>در قسمت تجربی این تحقیق صفحات اتصالی از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 که یکی از مواد پرمصرف در صنایع هوافضا می‌باشد با استفاده از پیچ و مهره فولادی و چسب مخصوص مونتاژ گردیدند. چسب مورد استفاده در این تحقیق، چسب Loctite 3421 می‌باشد که دارای مقاومت بالایی است. سپس به منظور بدست آوردن منحنی تنش-عمر و بررسی تاثیر نیروی پیش‌بار پیچ بر روی عمر خستگی صفحات اتصالی، نمونه‌هایی که به هر کدام نیروی پیش‌بار مختلف ناشی از گشتاور سفت کردن پیچ اعمال شده، تهیه و در دستگاه تست خستگی برای بارهای کششی مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از آزمایشات خستگی نشان داد که افزایش گشتاور سفت کننده باعث بهبود عمر در اتصالات ساده و مرکب می‌گردد، همچنین مشخص گردید که نمونه‌های مرکب دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به اتصالات ساده می‌باشند. علاوه بر تعیین عمر به روش تجربی، به منظور تعیین نحوه توزیع تنش و کرنش ناشی از نیروی پیش‌بار پیچ و بارهای کششی اعمالی در اتصالات از روش عددی به کمک نرم افزارهای تحلیل المان محدود استفاده شد. پس از انجام تحلیل‌های المان محدود از روش حجمی برای تخمین عمر خستگی اتصالات استفاده گردید. در پایان از چندین معیار چند محوری به منظور تخمین عمر خستگی در حضور بارگذاری چند محوری برای مقایسه نتایج استفاده گردید.</p>	

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

بخش اول - پیشینه تحقیق

فصل اول - مقدمه و بیان مساله

- ۲ - ۱-۱ - مقدمه و بیان مساله
- ۶ - ۲-۱ - اهمیت و ضرورت انجام تحقیق
- ۷ - ۳-۱ - جنبه جدید بودن و نوآوری در تحقیق
- ۸ - ۴-۱ - اهداف مشخص تحقیق
- ۱۰ - ۵-۱ - مروری بر فصل‌های پایان نامه

فصل دوم - بررسی منابع، پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

- ۱۲ - ۱-۲ - مطالعه خستگی در اتصالات دارای نیروی پیش‌بار پیچ
- ۱۸ - ۲-۲ - مطالعه خستگی در اتصالات مرکب
- ۲۷ - ۳-۲ - مفاهیم اولیه
- ۲۷ - ۱-۳-۲ - اثرات نیروی پیش‌بار پیچ در اتصالات
- ۳۰ - ۲-۳-۲ - اتصالات چسبی
- ۳۶ - ۱-۲-۳-۲ - روشهای تست و خصوصیات
- ۴۰ - ۳-۳-۲ - روش‌های متداول تخمین عمر خستگی
- ۴۱ - ۱-۳-۳-۲ - روش حجمی برای تخمین عمر خستگی
- ۴۶ - ۲-۳-۳-۲ - روشهای مورد استفاده در تخمین عمر خستگی در حضور تنش و کرنش چند محوری

بخش دوم - مواد و روشها

فصل سوم - انتخاب مواد و آزمایش‌های تجربی

- ۵۹ - ۱-۳ - مقدمه

۵۹	۲-۳- ورق های آلومینیومی
۶۱	۳-۳- پیچ، مهره و واشر
۶۲	۴-۳- چسب
۶۴	۵-۳- تعیین ضرایب اصطکاک
۶۴	۳-۵-۱- واشر و ورق آلومینیومی
۶۵	۳-۵-۲- آلومینیوم با آلومینیوم
۶۵	۳-۶- آماده سازی نمونه های آزمایشی
۷۰	۳-۷- روش تجربی برای اندازه گیری نیروی پیش بار اولیه در پیچ
۷۵	۳-۸- تستهای خستگی

فصل چهارم - شبیه سازی عددی و مدل المان محدود

۸۳	۴-۱- مقدمه
۸۳	۴-۲- مدل سازی المان محدود
۸۹	۴-۲-۱- بارگذاری مرحله اول (اعمال نیروی پیش بار)
۹۱	۴-۲-۲- بارگذاری مرحله دوم (اعمال تنش ماکزیمم بار سیکلی)

بخش سوم - نتایج و بحث

فصل پنجم - نتایج و بحث

۹۴	۵-۱- مقدمه
۹۴	۵-۲- تعیین رابطه بین نیروی پیش بار پیچ و گشتاور سفت کننده در نمونه های ساده پیچی و مرکب
۹۵	۵-۳- نتایج تست های خستگی
۱۰۱	۵-۴- تخمین عمر خستگی نمونه های با استفاده از روش حجمی
۱۰۴	۵-۵- پیش بینی عمر خستگی اتصالات با استفاده از معیارهای خستگی چندمحوری
۱۱۲	۵-۶- نتایج کلی پژوهش

۵-۷- پیشنهادات برای ادامه کار

۱۱۴

منابع مورد استفاده

۱۱۵

۴	شکل ۱-۱- انواع اتصالات مرکب
۱۲	شکل ۱-۲- نتایج تست‌های انجام شده بر روی نمونه‌های دارای اتصال پرچ و ترکیب اتصال پرچ و پیچ
۱۳	شکل ۲-۲- تغییر شکل سر پرچ و انبساط سوراخ بر حسب تابعی از نیروی فشردگی
۱۴	شکل ۳-۲- تاثیرات نیروی فشردگی بر روی عمر خستگی اتصال پرچ
۱۴	شکل ۴-۲- سه نوع موقعیت آغاز ترک برای اتصال پرچی
۱۶	شکل ۵-۲- اتصال آماده شده برای تحقیق (ابعاد بر حسب میلی‌متر می باشند).
۱۷	شکل ۶-۲- نمودار تنش-عمر برای نمونه‌های روغنکاری شده و خشک
۱۸	شکل ۷-۲- مقایسه مقاومت خستگی اتصال مرکب با اتصال ساده لحیم و نقطه جوش
۲۰	شکل ۸-۲- هندسه و ابعاد مربوط به اتصال تک لبه مرکب
۲۱	شکل ۹-۲- مقایسه توزیع تنش در اتصال چسبی و اتصال مرکب چسب و پیچ
۲۱	شکل ۱۰-۲- تاثیر پارامترهای هندسی اتصال مرکب بر روی بار منتقل شده توسط پیچ
۲۲	شکل ۱۱-۲- نمایش اثر مدول چسب بر روی بار انتقال یافته از طریق پیچ
۲۲	شکل ۱۲-۲- آزمایش انجام گرفته برای اندازه‌گیری بار منتقل شده از طریق پیچ در اتصال مرکب
۲۳	شکل ۱۳-۲- جزئیات پیچ اندازه‌گیری بار منتقل شده از طریق پیچ در اتصال مرکب
۲۳	شکل ۱۴-۲- مقایسه نتایج آزمایشات تجربی با نتایج پیش بینی شده
۲۴	شکل ۱۵-۲- نمونه آزمایشی برای تست‌های استاتیکی و خستگی
۲۵	شکل ۱۶-۲- منحنی تنش-کرنش کششی دو نوع چسب مورد استفاده
۲۵	شکل ۱۷-۲- توزیع تنش برای اتصال مرکب به ازای بار اعمالی $P = 4 kN$
۲۶	شکل ۱۸-۲- پیش بینی بار انتقال یافته توسط پیچ در اتصال مرکب
۲۷	شکل ۱۹-۲- اتصالات مکانیکی متداول
۲۸	شکل ۲۰-۲- ایجاد نیروی پیش بار در حین بستن پیچ و مهره
۲۹	شکل ۲۱-۲- انتقال موقعیت آغاز ترک در نتیجه نیروی پیش‌بار
۲۹	شکل ۲۲-۲- انتقال بار در سطح زیر سر پیچ

- شکل ۲-۲۳- اتصالات متداول چسبی ۳۱
- شکل ۲-۲۴- یک نمونه سطح مقطع هواپیمای کوچک با بدنه چسب شده ۳۲
- شکل ۲-۲۵- جان‌های برشی که مجموعه باکس بال را تشکیل می‌دهد. ۳۳
- شکل ۲-۲۶- منحنی S-N برای مقایسه مقاومت خستگی اتصالات چسب و پرچ ۳۵
- شکل ۲-۲۷- مودهای شکست در اتصال برشی چسبی ۳۵
- شکل ۲-۲۸- نمونه توده ای چسب برای بدست آوردن منحنی تنش- کرنش ۳۷
- شکل ۲-۲۹- هندسه مربوط به نمونه تست کشش ۳۷
- شکل ۲-۳۰- هندسه مربوط به نمونه تک لبه برشی ۳۸
- شکل ۲-۳۱- چرخش و خمش در نمونه تک لبه برشی بدلیل خروج از مرکزیت بار ۳۹
- شکل ۲-۳۲- هندسه نمونه با ادهرند ضخیم ۳۹
- شکل ۲-۳۳- توزیع تنش الاستیک- پلاستیک و گرادیان تنش نسبی در دیاگرام لگاریتمی برای ریشه ناچ ۴۲
- شکل ۲-۳۴- فرایند بکارگیری روش حجمی برای برآورد عمر خستگی. (الف)حالتی که منحنی مرجع یا منحنی نمونه بدون ناچ موجود باشد. (ب) حالتی که منحنی نمونه ناچ دار موجود باشد. ۴۵
- شکل ۲-۳۵- ماهیت فیزیکی معیار SWT ۵۰
- شکل ۲-۳۶- (الف) دایره مور برای تنش، (ب) دایره مور برای کرنش. ۵۳
- شکل ۲-۳۷- نمایش مقادیر بازه کرنش برشی، بازه تنش برشی، بازه کرنش عمودی و بازه تنش عمودی بر روی صفحه بحرانی توسط (الف) دایره مور برای تنش، (ب) دایره مور برای کرنش. ۵۳
- شکل ۲-۳۸- ماهیت فیزیکی معیار فاطمی و سوشی ۵۴
- شکل ۳-۱- تصاویری از پیچ ومهره شش گوش M5 تهیه شده. ۶۱
- شکل ۳-۲- قالب مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های چسب ۶۲
- شکل ۳-۳- نمونه کشش استاندارد چسبی تحت آزمایش کشش ۶۳
- شکل ۳-۴- منحنی تنش و کرنش مهندسی برای چسب Loctite 3421 ۶۳
- شکل ۳-۵- تصویری از نحوه انجام آزمایش تعیین ضریب اصطکاک ایستایی بین واشر و ورق آلومینیومی. ۶۴
- شکل ۳-۶- ابعاد و شکل نمونه ها (الف) اتصال ساده پیچی (ب) اتصال مرکب (چسب-پیچ) ۶۷
- شکل ۳-۷- برش قطعات اتصال در دستگاه برش. ۶۹

- شکل ۳-۸- سوراخکاری و ماشین کاری قطعات. ۶۹
- شکل ۳-۹- الف) نحوه اندازه‌گیری نیروی پیش‌بار پیچ، ب) ابعاد بوش مورد فولادی (بر حسب میلیمتر)، ج) نحوه تعبیه کرنش‌سنج‌ها بر روی بوش فولادی ۷۱
- شکل ۳-۱۰- منحنی تنش-کرنش مهندسی برای ماده بوش فولادی. ۷۲
- شکل ۳-۱۱- رابطه بین کرنش میانگین و گشتاور اعمالی برای هر دو نوع اتصال ۷۳
- شکل ۳-۱۲- رابطه بین نیروی پیش‌بار محاسبه شده و گشتاور اعمالی برای هر دو نوع اتصال ۷۴
- شکل ۳-۱۳- دستگاه تست خستگی Zwick/Roell Amsler HA250 ۷۵
- شکل ۳-۱۴- نحوه اعمال بارسیکلی بر نمونه به همراه موج انتخابی برای بارهای سیکلی. ۷۶
- شکل ۳-۱۵- منحنی تنش-عمر برای نمونه‌های ساده پیچی ۷۹
- شکل ۳-۱۶- منحنی تنش-عمر خستگی برای نمونه‌های مرکب ۷۹
- شکل ۴-۱- مدل سه بعدی المان محدود با شرایط مرزی و بارهای اعمالی ۸۴
- شکل ۴-۲- مدل سه بعدی المان محدود با شرایط مرزی و بارهای اعمالی ۸۵
- شکل ۴-۳- المان Contact 173 ۸۵
- شکل ۴-۴- المان Target 170 ۸۶
- شکل ۴-۵- منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 ۸۷
- شکل ۴-۶- منحنی تنش و کرنش مهندسی برای چسب Loctite 3421 ۸۸
- شکل ۴-۷- توزیع تنش σ_z های فشاری در ورق میانی برای هر دو نوع اتصال در اثر گشتاور سفت کننده
 $a (T=1 \text{ Nm} , b (T=2.5 \text{ Nm} c (T=5 \text{ Nm}$ ۹۰
- شکل ۴-۸- توزیع تنش σ_x ایجاد شده در ورق میانی در اثر گشتاور سفت کننده $a (T=1 \text{ Nm} , b (T=2.5 \text{ Nm} c (T=5 \text{ Nm}$ و اعمال نیروی کششی محوری $9/6$ کیلونیوتن ۹۲
- شکل ۵-۱- عمرهای خستگی بدست آمده از آزمایشات تجربی برای اتصالات ساده و مرکب به ازای مقادیر مختلف گشتاور سفت کننده ۹۶
- شکل ۵-۲- نمونه‌های شکسته شده در تست‌های خستگی که بازای گشتاور سفت کننده 1 Nm و حداکثر بار محوری اعمالی برابر 7.2 kN الف) اتصالات ساده ب) اتصال مرکب ۹۸
- شکل ۵-۳- بار انتقال یافته توسط نیروی اصطکاک بین صفحات اتصالی در برابر بار محوری اعمالی به اتصال به ۹۹

ازای سه مقدار مختلف گشتاور سفت کننده

- ۱۰۱ شکل ۴-۵- بار انتقال یافته توسط لایه چسب در برابر بار محوری اعمالی به اتصال به ازای سه مقدار مختلف گشتاور سفت کننده
- ۱۰۲ شکل ۵-۵- توزیع تنش باز کننده ترک و گرادیان نسبی تنش در اثر گشتاور سفت کننده 1 Nm و تنش محوری اعمالی 192 MPa
- ۱۰۳ شکل ۶-۵- توزیع تنش باز کننده ترک و گرادیان نسبی تنش در اثر گشتاور سفت کننده 2.5 Nm و تنش محوری اعمالی 192 MPa
- ۱۰۳ شکل ۷-۵- توزیع تنش باز کننده ترک و گرادیان نسبی تنش در اثر گشتاور سفت کننده 5 Nm و تنش محوری اعمالی 192 MPa
- ۱۰۴ شکل ۸-۵- منحنی تنش-عمر بدست آمده برای اتصالات مختلف بر مبنای روش حجمی و مقایسه با نتایج تجربی
- ۱۰۷ شکل ۹-۵- تغییرات تنش‌های اصلی در لبه سوراخ برای نمونه‌های مختلف برای تنش اعمالی بیشینه 168 MPa
- ۱۰۸ شکل ۱۰-۵- مقایسه عمرهای تجربی و عمرهای پیش‌بینی شده توسط معیارهای خستگی چند محوری برای نمونه‌های مرکب و ساده با گشتاور سفت کننده 1 Nm
- ۱۰۹ شکل ۱۱-۵- مقایسه عمرهای تجربی و عمرهای پیش‌بینی شده توسط معیارهای خستگی چند محوری برای نمونه‌های مرکب و ساده با گشتاور سفت کننده 2.5 Nm
- ۱۱۰ شکل ۱۲-۵- مقایسه عمرهای تجربی و عمرهای پیش‌بینی شده توسط معیارهای خستگی چند محوری برای نمونه‌های مرکب و ساده با گشتاور سفت کننده 5 Nm

فهرست جداول

صفحه

- جدول ۱-۲- معیارهای صفحه بحرانی به همراه نحوه محاسبه پارامترهای مربوطه ۵۷
- جدول ۱-۳- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 بدست آمده از تست استاندارد کشش ۶۶
- جدول ۲-۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 (مقادیر بر حسب درصد بیان شده‌اند). ۶۶
- جدول ۳-۳- نیروهای ماکزیمم انتخابی برای بارگذاری های سیکلی به همراه تنش ماکزیمم و دامنه تنش متناظر. ۷۷
- جدول ۴-۳- نتایج آزمایشات خستگی برای نمونه‌های ساده پیچی ۷۸
- جدول ۵-۳- نتایج آزمایشات خستگی برای نمونه‌های مرکب ۸۰
- جدول ۱-۵- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 مورد استفاده در معیارهای خستگی چند محوری. ۱۰۵
- جدول ۲-۵- مقادیر میانگین خطای محاسبه شده برای هر یک از معیارهای خستگی چندمحوری (مقادیر بر حسب درصد می‌باشند). ۱۱۱

فهرست نمادها

E	مدول الاستیسیته
G	مدول برشی
$J_{2,a}$	دامنه دومین نا متغیر تانسور تنش انحرافی
N_e	عمر خستگی تجربی
N_f	عمر خستگی
N_p	عمر خستگی پیش‌بینی شده
T	گشتاور
b	توان استحکام خستگی محوری
b'	توان استحکام خستگی برشی
c	توان شکل‌پذیری خستگی
c'	توان شکل‌پذیری خستگی برشی
k_f	ضریب کاهش مقاومت خستگی ناچ
x_{eff}	فاصله موثر
$\Delta\gamma$	بازه کرنش برشی بر روی صفحه بحرانی
$\Delta\gamma_{max}$	بیشینه تغییرات کرنش برشی
$\Delta\varepsilon_1$	دامنه بیشترین کرنش عمودی در صفحه بحرانی
$\Delta\varepsilon_n$	بازه کرنش عمودی بر روی صفحه بحرانی
$\Delta\tau$	بازه تنش برشی بر روی صفحه بحرانی
$\Delta\tau_{max}$	تغییرات تنش برشی حداکثر
γ_f'	ثابت شکل‌پذیری خستگی برشی
ε_1	مقدار کرنش اصلی اول
ε_3	مقدار کرنش اصلی سوم
ν	ضریب پواسون
σ_1	مقدار بیشینه تنش اصلی
σ_3	مقدار کمینه تنش اصلی
$\sigma_{H,max}$	تنش هیدرواستاتیک
σ_{eff}	تنش موثر
σ_{eq}	تنش تک محوری معادل
σ_{max}	تنش حداکثر
σ_n	بازه تنش عمودی بر روی صفحه بحرانی

σ_n^{max}

$\sigma_{notched}$

σ_{smooth}

σ_u

σ_y

$\sigma_{yy}(x)$

χ

بیشترین تنش عمودی در صفحه بحرانی

مقاومت خستگی نمونه ناچدار

مقاومت خستگی نمونه بدون ناچ

تنش نهایی ماده

تنش تسلیم

تنش باز کننده ترک

گرادیان تنش

بخش اول: پیشینه پژوهش

فصل اول

مقدمه، بیان مسئله و اهداف پایان نامه

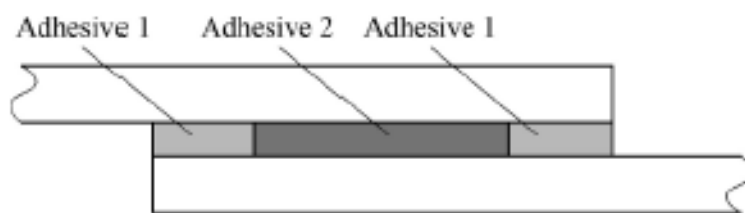
۱-۱ - مقدمه و بیان مسئله

طراحی اجزا و انتخاب مواد در صنعت هوافضا به دلیل وجود انواع بارهای دینامیکی در حین پرواز و حساسیت بالا در تامین ایمنی پرواز، همواره حائز اهمیت بوده و در این راستا تلاش‌های زیادی برای توسعه و بهینه‌سازی طراحی‌ها و خصوصیات مواد مصرفی به انجام می‌رسد. برای انتخاب مواد در این صنعت باید مسائلی از قبیل وزن کم، دوام و استحکام بالا، ضرایب اطمینان، هزینه، در دسترس بودن، قابلیت تولید، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری آنها را در نظر گرفت. از این رو آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا (استحکام ویژه) و قابلیت شکل‌پذیری مناسب به سرعت در صنایع هوافضا استفاده شد و تا حدود زیادی اهداف طراحان را برآورده ساخت. از جمله موادی که بطور معمول در بدنه هواپیماهای باری مورد استفاده قرار می‌گیرد، آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 می‌باشد. این آلیاژ دارای استحکام بالا به همراه چقرمگی شکست خوب می‌باشد [۱ و ۲]. نحوه اتصال اجزاء و قطعات مکانیکی نقش بسیار مهمی در تعیین مقاومت و کارایی آنها ایفا می‌کند. در اتصال قطعات روش‌های مختلفی از جمله پیچ‌کاری، پرچ‌کاری، چسب کاری، اتصال مرکب و غیره به کار می‌روند [۳-۵]. قطعات پیچ و مهره شده دارای مقاومت بالاتری نسبت به اتصالات پرچ شده می‌باشند. با این حال مشکل عمده این اتصالات وجود سوراخ و در نتیجه تمرکز تنش در اطراف آن می‌باشد. تحلیل و بررسی رفتار اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری در مراجع و مقالات زیادی بحث شده است [۶ و ۷]. یکی دیگر از روش‌های اتصال اجسام به یکدیگر استفاده از چسب می‌باشد. با وجود آثار گذشته می‌توان به استفاده از این اتصالات تا حدود سه هزار سال قبل پی برد. البته تا قرن بیستم، پیشرفت این اتصالات بطور چشمگیری نبوده و گسترش وسیع این اتصالات را می‌توان از سال ۱۹۵۰ به بعد دانست [۸ و ۹]. امروزه بدلیل کاربرد وسیع اتصالات چسبی در صنایع هوایی، الکترونیک، اتومبیل، نظامی، پزشکی و دریایی تحقیقات بسیار وسیعی در این زمینه انجام شده است [۱۰-۱۲]. اتصالات چسبی در مقایسه با اتصالات مکانیکی دارای ویژگی‌های زیادی از جمله کاهش ضریب تمرکز تنش، کاهش وزن سازه، مقاومت بالا در برابر نیروهای برشی و خوردگی می‌باشد. مجموع عوامل ذکر شده باعث ترغیب طراحان صنایع هوافضا،

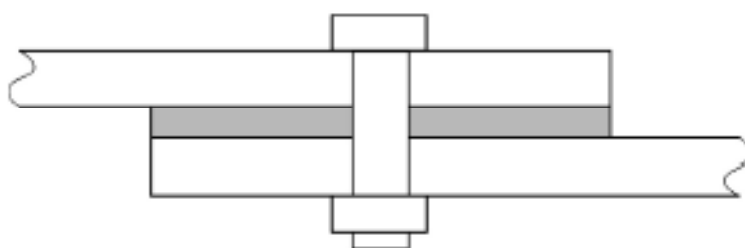
دریایی و اتومبیل‌سازی به استفاده از اتصالات چسبی شده است [۱۳-۱۵]. بررسی‌ها نشان داده است که اتصالات چسب شده مقاومت ضعیف‌تری نسبت به اتصال پیچ و مهره دارند. بنابراین به منظور کاهش نواقص اتصالات پیچ شده و چسب‌کاری شده از ترکیب همزمان این دو نوع اتصال، تحت عنوان اتصالات مرکب استفاده می‌گردد [۱۵ و ۱۶]. اتصالات مرکب بطور گسترده‌ای در صنایع هوایی برای اتصال کامپوزیت‌ها و فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع اتصالات کارآیی بهتری را در افزایش مقاومت خستگی در مقایسه با اتصالات چسبی و اتصالات پیچی ساده از خود نشان داده‌اند. کارآیی بهتر اتصالات مرکب ناشی از بعضی ویژگی‌های این اتصالات می‌باشد، از جمله اینکه چسب توزیع تنش را یکنواخت می‌کند، در حالی که پیچ موجب ایجاد توزیع غیر یکنواخت تنش می‌گردد. در دهه ۹۰ مقاومت خستگی اتصالات مرکب از نوع چسب و پرچ در فولادهای مقاوم توسط Imanaka و همکاران [۴] مورد مطالعه قرار گرفت. آنها دریافتند که مقاومت خستگی اتصالات مرکب بهتر از حالتی است که تنها از چسب استفاده می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که ترک در اتصال مرکب چسب و پرچ آهسته‌تر از حالتی که تنها چسب استفاده شود گسترش می‌یابد [۱۷-۲۰]. همان‌طور که ذکر گردید پیچ و مهره و چسب از جمله اتصالات مکانیکی می‌باشد که به منظور اتصال قسمت‌های مختلف در سازه‌های هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما وجود سوراخ ناشی از فرایندهای سوراخ‌کاری در این نوع از اتصالات، موجب ایجاد تمرکز تنش موضعی در اطراف سوراخ هر اتصال گردیده و این نقاط تحت بارهای دینامیکی پرواز، مستعد ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی می‌باشند. در این موارد گسیختگی در یک اتصال می‌تواند به جدایی قسمت‌های مختلف سازه و در برخی موارد باعث وقوع حوادث فاجعه بار شود. بنابراین اهمیت و ضرورت بررسی دقیق‌تر استحکام در اتصالات پیچ و چسب شده روشن و پر واضح می‌شود تا جایی که پیشگویی در نحوه ایجاد آسیب‌ها می‌تواند از وقوع حوادث تلخ تا حد امکان جلوگیری کند.

چندین روش اتصال مرکب وجود دارد که در آن فرایندهای مختلف اتصال با هم ترکیب شده و یک اتصال ترکیبی با قابلیت‌های بهتر بوجود می‌آورند. بعضی مواقع در اتصال مرکب حاصله، ویژگی‌ها و قابلیت‌های هر دو

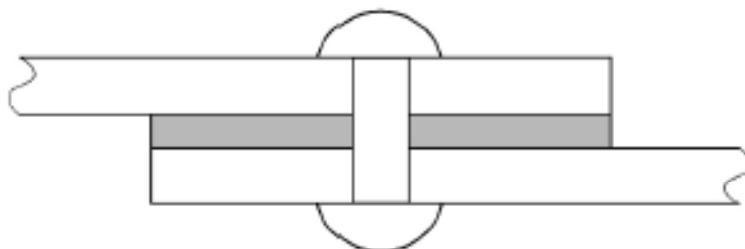
اتصال مولد به سادگی با هم ترکیب می گردند تا قابلیت های مناسبتری ایجاد گردد. از جمله از اتصالات مرکب می توان به اتصال مرکب چسب-پرچ، چسب-جوش، چسب-پیچ اشاره کرد (شکل ۱-۱).



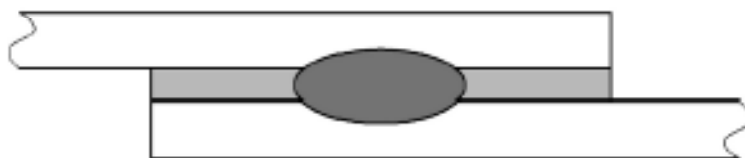
Mixed adhesive joint



Bolted-bonded joint



Rivet-bonded joint



Weld-bonded joint

شکل ۱-۱- انواع اتصالات مرکب [۱۳].

اتصال مرکب پرچ-چسب ترکیبی از اتصال چسبی و اتصال مکانیکی که در آن از پرچ به عنوان ابزار اتصالی استفاده شده می‌باشد. از اتصال مرکب پرچ و چسب در صنعت هلی‌کوپترسازی بصورت گسترده استفاده شده است. از پرچ‌ها در این اتصالات به منظور تحمل بارهای خارج از صفحه پیش‌بینی نشده استفاده گردیده تا از شکست اتصال چسبی در اثر تنش عمودی^۱ جلوگیری گردد. بعلاوه چسب باعث پخش بارگذاری و جلوگیری از تمرکز تنش در اطراف پرچ‌ها گردیده و عمر خستگی را بهبود می‌بخشد. امتیاز دیگر این نوع اتصالات در سازه‌های هلی‌کوپتر مستهلک کردن ارتعاشات می‌باشد.

اتصال مرکب جوش-چسب روشی است که در آن از ترکیب اتصال نقطه جوش و چسب با هم استفاده می‌گردد. بطور معمول لایه‌ای از چسب بر روی یکی از عضوهای فلزی که قرار است به هم متصل گردند، اعمال می‌شود و فلز دیگر بر روی آن قرار می‌گیرد تا یک اتصال برشی ساخته شود. سپس این اتصال چسبی به وسیله فیکسچر مخصوص بر روی همدیگر نگه داشته می‌شود و در نهایت از نقطه جوشهایی که فاصله مرکز تا مرکز آنها در حدود ۲/۵ تا ۵ سانتی متر می‌باشد برای ایجاد اتصال مرکب نهایی استفاده می‌گردد. در روش دیگر برای بدست آوردن این اتصال مرکب، ابتدا نقطه جوشها ایجاد گردیده و در نهایت شکاف بین فلزات بوسیله چسب پر می‌گردد [۲۱ و ۲۲].

در نوع دیگری از اتصال مرکب، به منظور ایجاد توزیع تنش بهتر و افزایش مقاومت اتصال چسبی، از چند نوع چسب با مدول الاستیسیته مختلف برای اتصال استفاده می‌گردد [۲۳ و ۲۴]. در این اتصال مرکب، چسب ترد با مدول الاستیسیته بالا در قسمت وسطی اتصال و چسب نرم در لبه‌های طول هم پوشانی، جایی که مستعد ایجاد تمرکز تنش است، استفاده می‌گردد.

1 - Peel stress

۱-۲- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

همانطور که اشاره گردید، در اتصال قطعات روش‌های مختلفی از جمله پیچ کاری، پرچ کاری، چسب کاری، اتصال مرکب و غیره به کار می‌روند. قطعات پیچ و مهره شده دارای مقاومت بالاتری نسبت به اتصالات پرچ شده می‌باشند. با این حال مشکل عمده این اتصالات وجود سوراخ و در نتیجه تمرکز تنش در اطراف آن می‌باشد. تحلیل و بررسی رفتار اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری در مراجع و مقالات زیادی بحث شده است. استفاده از چسب نیز به جای پیچ و مهره در انواع اتصالات بخصوص در مواد کامپوزیتی و پلیمری به علت حساس بودن این مواد به سوراخ و تمرکز تنش مورد توجه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داده است که اتصالات چسب شده از مقاومت ضعیف‌تری نسبت به اتصال پیچ و مهره برخوردار بوده و حساسیت بالایی به تنش‌های برشی از خود نشان می‌دهند. به منظور کاهش نواقص اتصالات پیچ شده و چسب کاری شده از ترکیب همزمان این دو نوع اتصال، تحت عنوان اتصالات مرکب استفاده می‌گردد. استفاده از این اتصالات مرکب باعث بهبود کارایی اتصال نسبت به تک تک آنها بخصوص در طول‌های هم‌پوشانی بالای چسب (در موارد استفاده برای صنایع هوافضا) می‌شود. همان‌طور که ذکر گردید پیچ و مهره و چسب یکی از انواع اتصالات می‌باشد که برای اتصال قسمت‌های اصلی سازه‌های هوایی بکار می‌رود، اما به دلیل ایجاد سوراخ در قطعات اتصالی، تمرکز تنش موضعی در اطراف سوراخ هر اتصال به وجود آمده و این نقاط تحت بارهای دینامیکی پرواز، مستعد ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی می‌باشند. در این موارد گسیختگی در یک اتصال می‌تواند به جدایی قسمت‌های مختلف سازه و در برخی موارد باعث وقوع حوادث فاجعه بار شود. بنابراین اهمیت و ضرورت بررسی دقیق‌تر استحکام در اتصالات پیچ و چسب شده روشن و پر واضح می‌شود تا جایی که پیشگویی در نحوه ایجاد آسیب‌ها می‌تواند از وقوع حوادث تلخ تا حد امکان جلوگیری کند. در این‌گونه موارد تحلیل ریاضی تنش و کرنش به دلیل وجود برخی پارامترهای پیچیده نظیر مسئله غیرخطی تماس، اصطکاک سطوح تماس یابنده، نیروی پیش‌بار، هندسه و سختی عضوهای متصل‌شده، رفتار الاستیک-پلاستیک مواد و وضعیت اتصال عملاً غیرممکن است. به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی و حل عددی با استفاده

از روش المان محدود، راهی مناسب برای اطلاع از نحوه توزیع تنش و کرنش در قطعات اتصالی به وسیله پیچ و چسب می‌باشد. لازم به ذکر است که در قسمت شبیه‌سازی عددی با توجه به اینکه جنس واشر و پیچ دارای خواص کششی تقریباً یکسانی بوده و بررسی تنش‌های بین سر پیچ و واشر به هدف مورد پژوهش چندان ارتباطی ندارد لذا مدل واشر و پیچ یک تکه فرض شده است. همچنین جدا شدن سطوح تماس بین ورق‌های آلومینیومی و لایه چسب در تحلیل المان محدود مربوط به نمونه‌های مرکب در نظر گرفته نشده است.

۱-۳- جنبه جدید بودن و نوآوری در تحقیق

مطالعات زیادی در مورد اثر نیروی پیش‌بار پیچ^۱ بر روی عمر خستگی اتصالات انجام گردیده است. و همچنین تحقیقات متعددی بر روی نحوه توزیع تنش و کرنش و همچنین تخمین عمر خستگی در اتصالات مرکب چسب-جوش، چسب-پرچ و اتصال مرکب چسب-پیچ انجام گرفته است، ولی مطالعه اثر نیروی محوری پیچ در اتصالات مرکب پیچ-چسب بر روی عمر خستگی اتصالات و تاثیر آن بر روی نحوه توزیع تنش برای اولین بار در این پایاننامه ارائه شده است.

طراحی اجزا و انتخاب مواد در صنعت هوافضا به دلیل وجود انواع بارهای دینامیکی در حین پرواز و حساسیت بالا در تامین ایمنی پرواز، همواره حائز اهمیت بوده و در این راستا تلاش‌های زیادی برای توسعه و بهینه‌سازی طراحی‌ها و خصوصیات مواد مصرفی به انجام می‌رسد. برای انتخاب مواد در این صنعت باید مسائلی از قبیل وزن کم، دوام و استحکام بالا، ضرایب اطمینان، هزینه، در دسترس بودن، قابلیت تولید شدن، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری آنها را در نظر گرفت. از این رو آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن نسبت

1- Clamping force