بسم الله الرحمن الرحیم

۹۳٤٦۲۳۲٥۲

به نام خدا

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

توزیع تنش در اتصالات چسبی مواد مرکب تحت اثر گشتاور خمشی

استاد راهنما:

دکتر محمد شیشه‌ساز

استاد مشاور:

دکتر خسرو نادران طحان

نگارنده:

محمد حسین قارونی

تیر ۱۳۹۳

بسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه ارشد)

پایان نامه آقای محمد حسین قارونی **دانشجوی رشته:** مکانیک **گرایش:** طراحی کاربردی

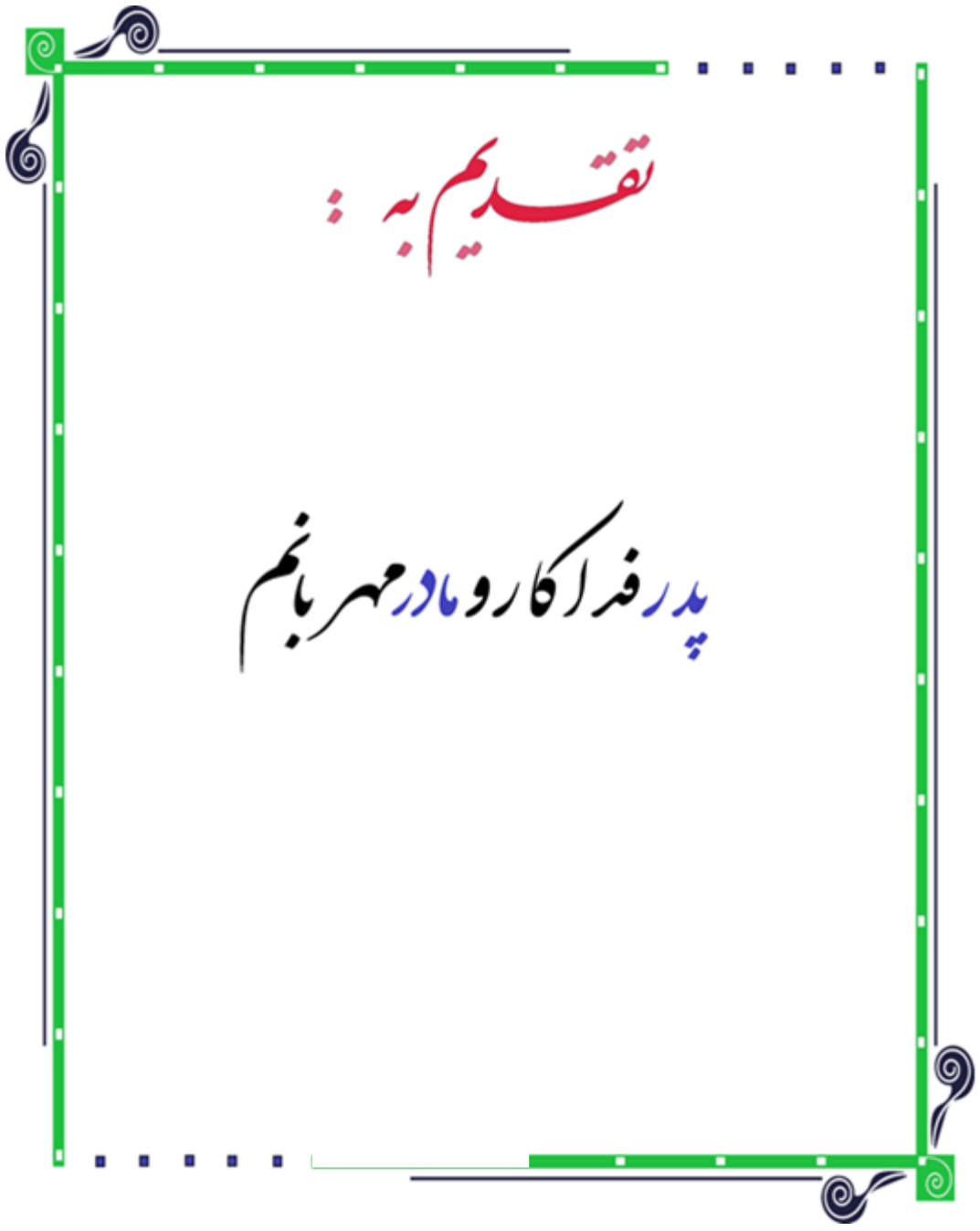
دانشکده مهندسی **به شماره دانشجویی** ۹۰۴۰۱۱۰

با عنوان :

توزیع تنش در اتصالات چسبی مواد مرکب تحت اثر گشتاور خمشی

جهت اخذ مدرک : **کارشناسی ارشد** در تاریخ : **۱۳۹۳/۰۴/۱۷** توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه **عالی** تصویب گردید.

	رتبه علمی	**امضاء**
۱. **اعضا ی هیأت داوران :**		
استاد راهنما : دکتر محمد شیشه‌ساز	استاد	.....
استاد مشاور : دکتر خسرو نادران طحان	دانشیار	.....
استاد داور : دکتر کورش حیدری شیرازی	دانشیار	.....
استاد داور : دکتر امین یاقوتیان	استادیار	.....
نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر مسعود اولی‌پور	استادیار	.....
۲. **مدیرگروه :** دکتر علی حاج نایب	استادیار	.....
۳. **معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :** دکتر علی حقیقی	استادیار	.....
۴. **مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه :** دکتر عبدالرحمن راسخ	استاد	.....


تقدیم به :
پدر فداکار و مادر مهربانم

تقدیر و تشکر

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از زحمات بی دریغ استاد راهنمای ارجمند، جناب آقای دکتر محمد شیشه ساز که با راهنمایی های خود راهگشای اینجانب بوده اند، اعلام می دارم.

هم چنین از زحمات جناب آقای دکتر خسرو نادران طحان استاد مشاور ارجمند، که مرا در انجام هر چه بهتر این پایان نامه یاری نمودند، صمیمانه تشکر می کنم.

فهرست مطالب

فرم ارزشیابی ..... **أ**

صفحه تقدیم ..... **ب**

صفحه تقدیر و تشکر ..... **ج**

فهرست مطالب ..... **د**

فهرست شکل‌ها ..... **ز**

فهرست جدول‌ها ..... **ط**

فهرست علامت‌ها ..... **ی**

چکیده پایان‌نامه به زبان فارسی ..... **م**

فصل اول

مقدمه **۱**

۱-۱ تعریف ماده مرکب ۲

۱-۲ انواع مواد مرکب ۲

۱-۳ انواع اتصال‌ها ۳

۱-٤ اتصال‌های چسبی ٤

۱-۵ هدف پایان‌نامه ۵

۱-٦ ساختار پایان‌نامه ٦

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین **۷**

فصل سوم

تئوری و معادلات حاکم بر تنش در اتصال‌های چسبی **۱۱**

۳-۱ اتصال تک‌لبه ۱۱

۳-۱-۱ روند استخراج معادلات حاکم ۱۲

۳-۱-۲ رابطه‌ی نیرو-جابجایی ۱۵

۳-۱-۳ مواد مرکب چند لایه ۱۷

۳-۱-٤ تئوری ورق مرتبه اول ۱۷

۳-۱-۵ روابط کرنش-جابجایی ۱۸
۳-۱-٦ روابط نیرو و ممان با کرنش و انحنا ۱۹
۳-۲ اتصال تک‌لبه متقارن و متوازن..... ۲۸
۳-۳ کسر حجمی الیاف ۲۹
٤-۳ چیدمان الیاف در ماتریس ۳۰
۳-۵ مدل المان محدود اتصال تک‌لبه ۳۰
فصل چهارم
ارائه نتایج..... ۳۷
٤-۱ اتصال تک‌لبه متقارن..... ۳۷
٤-۲ اتصال تک‌لبه‌ی نامتقارن..... ٤٤
٤-۳ بررسی اثر خواص مکانیکی و هندسی لایه‌ی چسب بر توزیع تنش..... ۵۰
٤-۳-۱ بررسی اثر مدول الاستیسیته ۵۱
٤-۳-۲ بررسی اثر ضخامت ۵۳
٤-۳-۳ بررسی اثر طول ۵۵
٤-٤ بررسی اثر خواص مکانیکی و هندسی ورق‌های چسب‌شونده بر توزیع تنش..... ۵٦
٤-٤-۱ بررسی اثر مدول الاستیسیته ۵۷
٤-٤-۲ بررسی اثر ضخامت ۵۹
٤-٤-۳ بررسی اثر زاویه‌ی الیاف..... ٦۱
٤-۵ بررسی اثر الیاف..... ٦۳
٤-۵-۱ بررسی اثر کسر حجمی الیاف..... ٦٤
٤-۵-۲ بررسی اثر مدول الاستیسیته ٦۷
٤-۵-۳ بررسی اثر چیدمان الیاف..... ٦۹
فصل پنجم
نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۷۳
۵-۱ نتیجه‌گیری ۷۳
۵-۲ پیشنهادها..... ۷۵
مراجع ۷٦
پیوست الف
ضرایب روابط و معادلات دیفرانسیلی..... ۷۸

پیوست ب

برنامه کامپیوتری نرم‌افزار متلب ۸۲

چکیده پایان‌نامه به زبان انگلیسی ۸۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱: مدل دو بعدی اتصال تک‌لبه ۱۲
شکل ۳-۲: نمودار جسم آزاد یک المان از اتصال تک‌لبه ۱۳
شکل ۳-۳: نیروهای داخلی ایجاد شده در اتصال بر اثر اعمال گشتاور خمشی ۱٤
شکل ۳-٤: محور مختصات محلی و اصلی برای یک تک‌لایه‌ی زاویه‌دار ۱۵
شکل ۳-۵: تغییر شکل انتهای لبه‌ی ورق در تئوری ورق مرتبه اول ۱۸
شکل ۳-٦: موقعیت مختصاتی تک‌لایه‌ها در یک ورق چندلایه ۲۰
شکل ۳-۷: چینش الیاف به‌صورت مربعی در ماتریس ۳۱
شکل ۳-۸: چینش الیاف به‌صورت شش ضلعی در ماتریس ۳۱
شکل ۳-۹: المان Solid185 ..... ۳۳
شکل ۳-۱۰ : المان Solid186 ..... ۳٤
شکل ۳-۱۱: مدل سه بعدی اتصال تک‌لبه در نرم‌افزار انسیس ۳٤
شکل ۳-۱۲ الف: نحوه‌ی اعمال نیرو و تکیه‌گاه در اتصال تک‌لبه ۳۵
شکل۳-۱۲ ب: نحوه‌ی اعمال نیرو و تکیه‌گاه‌ها در اتصال تک‌لبه از نمای ۳ بعدی ۳٦
شکل ٤-۱: نحوه قرارگیری لایه‌ها ۳۸
شکل ٤-۲: تغییر شکل اتصال تک‌لبه متقارن ۳۹
شکل ٤-۳: نمودار جابجایی در راستای ضخامت در اتصال تک‌لبه متقارن ۳۹
شکل ٤-٤: نمودار توزیع تنش برشی در اتصال تک‌لبه متقارن ٤۰
شکل ٤-۵: نمودار توزیع تنش تورق در اتصال تک‌لبه متقارن ٤۱
شکل ٤-٦: نمودار نیروی طولی در ورق در اتصال تک‌لبه‌ی متقارن ٤۲
شکل ٤-۷: نمودار نیروی برشی عرضی در ورق در اتصال تک‌لبه متقارن ٤۳
شکل ٤-۸: نمودار گشتاور خمشی در اتصال تک‌لبه متقارن ٤۳
شکل ٤-۹: نحوه آرایش لایه‌های چسب‌شونده در اتصال تک‌لبه نامتقارن ٤٤
شکل ٤-۱۰: تغییر شکل اتصال تک‌لبه نامتقارن ٤۵
شکل ٤-۱۱: نمودار جابجایی اتصال تک‌لبه نامتقارن ٤۵
شکل ٤-۱۲: نمودار توزیع تنش برشی در اتصال تک‌لبه نامتقارن ٤٦
شکل ٤-۱۳: توزیع تنش تورق در اتصال تک‌لبه نامتقارن ٤۷
شکل ٤-۱٤: نمودار نیروی طولی در ورق‌ها در اتصال تک‌لبه‌ی نامتقارن ٤۸
شکل ٤-۱۵: نمودار نیروی برشی عرضی در ورق‌ها در اتصال تک‌لبه‌ی نامتقارن ٤۹
شکل ٤-۱٦: نمودار گشتاور خمشی در ورق‌ها در اتصال تک‌لبه‌ی نامتقارن ۵۰

شکل ٤-١٧: نمودار توزیع تنش برشی با مدول‌های الاستیسیته مختلف لایه‌ی چسب ٥١
شکل ٤-١٨: نمودار توزیع تنش تورق با مدول‌های الاستیسیته مختلف لایه‌ی چسب.....٥٢
شکل ٤-١٩: نمودار توزیع تنش برشی برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی چسب.....٥٣
شکل ٤-٢٠: نمودار توزیع تنش تورق برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی چسب ٥٤
شکل ٤-٢١: نمودار توزیع تنش برشی با طول‌های مختلف لایه‌ی چسب ٥٥
شکل ٤-٢٢: نمودار توزیع تنش تورق با طول‌های مختلف برای لایه‌ی چسب ٥٦
شکل ٤-٢٣: نمودار تنش برشی برای مدول‌های الاستیسیته مختلف ورق‌های چسب‌شونده ٥٧
شکل ٤-٢٤: نمودار تنش تورق برای مدول‌های الاستیسیته مختلف ورق‌های چسب‌شونده.....٥٨
شکل ٤-٢٥: نمودار تنش برشی برای ضخامت‌های مختلف ورق‌های چسب‌شونده ٥٩
شکل ٤-٢٦: نمودار تنش تورق برای ضخامت‌های مختلف ورق‌های چسب‌شونده.....٦٠
شکل ٤-٢٧: نمودار توزیع تنش برشی برای زاویه‌های مختلف ٦٢
شکل ٤-٢٨: نمودار توزیع تنش تورق برای زاویه‌های مختلف.....٦٢
شکل ٤-٢٩: نمودار بیشیته تنش برشی برای کسرهای حجمی مختلف.....٦٤
شکل ٤-٣٠: نمودار اثر کسرهای حجمی مختلف الیاف بر بیشینه تنش تورق.....٦٥
شکل ٤-٣١: نمودار بیشینه تنش برشی و تورق برای کسرهای مختلف الیاف.....٦٦
شکل ٤-٣٢: نمودار توزیع تنش برشی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی الیاف ٦٧
شکل ٤-٣٣: نمودار توزیع تنش تورق برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی الیاف ٦٨
شکل ٤-٣٤: مقایسه بیشینه تنش برشی برای چیدمان مربعی و شش ضلعی.....٦٩
شکل ٤-٣٥: مقایسه بیشینه تنش تورق برای چیدمان مربعی و شش ضلعی ٧١

فهرست جدول‌ها

جدول ٤-١: مشخصات هندسی و مادی لایه‌ی چسب و چسب‌شونده ٣٨
جدول ٤-٢: مقایسه مقادیر تنش بیشینه در لایه‌ی چسب در اتصال تک‌لبه‌ی مقارن ٤٢
جدول ٤-٣: مقایسه مقادیر تنش بیشینه در لایه‌ی چسب در اتصال تک‌لبه‌ی نامتقارن ٤٨
جدول ٤-٤: مقایسه‌ی نتایج بیشینه تنش بر اثر تغییر مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی چسب ٥٣
جدول ٤-٥: مقایسه‌ی نتایج بیشینه تنش برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی چسب ٥٥
جدول ٤-٦: مشخصات ورق‌های چسب‌شونده ٥٧
جدول ٤-٧: مقایسه‌ی بیشینه تنش برشی و تورق بر اثر تغییر مدول الاستیسیته‌ی ورق‌های چسب‌شونده.٥٩
جدول ٤-٨: مقایسه‌ی بیشینه تنش برشی و تورق برای ضخامت‌های مختلف ورق‌های چسب‌شونده ٦١
جدول ٤-٩: مقایسه اختلاف بیشینه تنش برشی و تورق برای زاویه‌های مختلف الیاف ٦٣
جدول ٤-١٠: خواص الیاف شیشه نوع E و اپوکسی ٦٤
جدول ٤-١١: درصد تفاوت بیشینه تنش برای کسرهای حجمی الیاف متفاوت ٦٦
جدول ٤-١٢: اختلاف بیشینه تنش برشی و تورق برای مدول الاستیسیته‌ی مختلف الیاف ٦٨
جدول ٤-١٣: بررسی اثر نسبت d/s بر بیشینه تنش برشی در چیدمان مربعی و شش ضلعی ٧٠
جدول ٤-١٤: بررسی تفاوت بیشینه تنش تورق در چیدمان مربعی و شش ضلعی برای نسبت‌های d/s مختلف ٧٢

فهرست علامت‌ها

علامت‌های لاتین

A_{ij}	ماتریس سختی کششی
a_i	کمیت تعریف شده در رابطه‌ی (۳-۴۳)
B_i	کمیت تعریف شده در رابطه‌ی (۳-۴۷)
B_{ij}	ماتریس سختی کوپلینگ
D_{ij}	ماتریس سختی خمشی
d	قطر الیاف
d_i	کمیت تعریف شده در رابطه‌ی (۳-۴۳)
E_{1x}	مدول الاستیسیته‌ی طولی لایه‌های شماره ۱
E_{1z}	مدول الاستیسیته‌ی عرضی لایه‌های شماره ۱
E_{2x}	مدول الاستیسیته‌ی طولی لایه‌های شماره ۲
E_{2z}	مدول الاستیسیته‌ی عرضی لایه‌های شماره ۲
E_3	مدول الاستیسیته‌ی طولی لایه چسب
E_f	مدول الاستیسیته‌ی الیاف
E_{ii}	مدول الاستیسیته‌ی در جهت‌های اصلی
E_m	مدول الاستیسیته‌ی ماتریس
G_{12}	مدول برشی طولی
G_{23}	مدول برشی عرضی
G_3	مدول برشی لایه چسب
G_f	مدول برشی الیاف
G_m	مدول برشی ماتریس
H_i	کمیت تعریف شده در روابط (۳-۵) و (۳-۴۷)
h_k	فاصله‌ی هر لایه تا سطح میانی
K	ضریب تصحیح برشی
L_1	طول ورق شماره ۱
L_2	طول ورق شماره ۲
l	نصف طول ناحیه‌ی چسبی
M_0	گشتاور خمشی خارجی بر واحد پهنا اعمال شده به اتصال

M_1	گشتاور خمشی در ورق شماره ۱
M_2	گشتاور خمشی در ورق شماره ۲
N_1	نیروی طولی در ورق شماره ۱
N_2	نیروی طولی در ورق شماره ۲
p	کمیت تعریف شده در رابطه‌ی (۳-۴۹)
Q	ماتریس سختی
$\bar{Q}$	ماتریس سختی تبدیل یافته
Q_1	نیروی برشی عرضی در ورق شماره ۱
Q_2	نیروی برشی عرضی در ورق شماره ۲
q	کمیت تعریف شده در رابطه‌ی (۳-۴۹)
R	ماتریس ریوتر
s	فاصله‌ی بین دو الیاف مجاور
T	ماتریس تبدیل
t_i	ضخامت ورق‌های چسب‌شونده و لایه‌ی چسب
u_i	جابجایی ورق شماره ۱ و ۲ در راستای x
u_0^i	جابجایی سطح میانی ورق شماره ۱ و ۲ در راستای x
v	جابجایی در راستای y
v_0	جابجایی سطح میانی در راستای y
w	جابجایی در راستای z
w_0^i	جابجایی سطح میانی ورق شماره ۱ و ۲ در راستای z
Z	فاصله‌ی هر لایه نسبت به سطح میانی

علامت‌های یونانی

α_i	ضرایب معادله دیفرانسیل رابطه‌ی (۳-۵۰)
β_i	کمیت تعریف شده در معادله‌ی (۳-۴۸)
γ_{xz}	کرنش برشی
γ_{xz}^0	کرنش برشی سطح میانی
ε_{ix}	کرنش طولی
ε_{ix}^0	کرنش طولی سطح میانی
ε_{iz}	کرنش عرضی
ε_{iz}^0	کرنش عرضی سطح میانی

θ	زاویه‌ی الیاف
κ	انحنا
λ_i	ضرایب معادله دیفرانسیل رابطه‌ی (۳-۵۲)
μ_{ixz}	ضریب پواسون لایه‌های شماره ۱ و ۲
μ_3	ضریب پواسون لایه چسب
σ	تنش ناشی از تورق در لایه‌ی چسب
τ	تنش برشی در لایه‌ی چسب
ϕ	زاویه‌ی بین خط عمود و سطح میانی ورق
χ_i	کمیت تعریف شده در معادله‌ی (۳-۶۳)
ψ_i	ضرایب معادله دیفرانسیل رابطه‌ی (۳-۵۳)
ω_i	کمیت تعریف شده در معادله‌ی (۳-۶۶)

چکیده

نام خانوادگی: قارونی	**نام:** محمد حسین	**شماره دانشجویی:** ۹۰٤۰۱۱۰
عنوان پایان نامه: توزیع تنش در اتصالات چسبی مواد مرکب تحت اثر گشتاور خمشی		
استاد راهنما: دکتر محمد شیشه‌ساز		
استاد مشاور: دکتر خسرو نادران طحان		
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته:** مهندسی مکانیک	**گرایش:** طراحی کاربردی
دانشگاه: شهید چمران اهواز	**دانشکده:** مهندسی	**گروه:** مکانیک
تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۳/۰٤/۱۷		**تعداد صفحه: ۸۷**

کلید واژه ها: تنش برشی، تنش ناشی از تورق، اتصال چسبی تک‌لبه، مواد مرکب، تئوری ورق مرتبه اول.

در این پایان‌نامه توزیع تنش برشی و تنش ناشی از تورق در اتصالات چسبی تک‌لبه در سطح میانی لایه‌ی چسب، مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌ی چسب به‌صورت همسانگرد و ورق‌های چسب‌شونده از نوع ارتوتروپیک عمومی می‌باشند که تحت گشتاور خمشی قرار گرفته‌اند. ضخامت و جنس دو ورق چسب‌شونده می‌توانند با یکدیگر متفاوت باشند ولی چیدمان لایه‌ها در هر دو ورق متقارن می‌باشد. رفتار چسب و لایه‌ها در محدوده‌ی الاستیک خطی است. در این تحلیل از تئوری ورق مرتبه اول دو بعدی استفاده شده و هم‌چنین توزیع تنش در لایه‌ی چسب در راستای ضخامت ثابت فرض شده است. هم‌چنین به‌بررسی اثر تغییر در مدول الاستیسیته، ضخامت و طول لایه‌ی چسب و مدول الاستیسیته و ضخامت ورق‌های چسب‌شونده و زاویه‌ی قرارگیری، حجم کسری الیاف (تعداد الیاف)، مدول الاستیسیته و چیدمان الیاف در ماتریس (زمینه) نیز پرداخته شده است. نتایج بدست آمده به روش تحلیلی با نتایج بدست آمده از حل المان محدود به‌کمک نرم‌افزار انسیس مقایسه شده و تطابق نسبتاً خوبی نیز بین این نتایج مشاهده شده است. با تغییر در برخی از مشخصات لایه‌ی چسب و ورق‌های چسب‌شونده نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه‌های چسب و چسب‌شونده و افزایش مدول الاستیسیته لایه‌های چسب‌شونده، بیشینه تنش برشی و تورق کاهش و با افزایش مدول الاستیسیته لایه‌ی چسب، بیشینه تنش برشی و تورق افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به نتایج حاصل شده، توزیع تنش علاوه بر مشخصات هندسی و مادی لایه‌های چسب و چسب‌شونده، به نحوه‌ی قرارگیری، حجم کسری و جنس الیاف در ماتریس نیز بستگی دارد.

فصل اول

مقدمه

مواد مرکب از قرن‌ها پیش مورد استفاده بوده است. هنوز تاریخ مشخصی به‌عنوان شروع استفاده از مواد مرکب ثبت نشده است. از اولین اطلاعات ثبت شده بیانگر استفاده‌ی مصریان از کاه جهت بالا بردن مقاومت آجرهای گِلی بوده است. هر کدام از این اجزا (کاه و گل) به تنهایی نمی‌توانستند کارایی مناسبی داشته باشند. برخی بر این باورند که، علت استفاده از کاه جلوگیری از ترک خوردن گِل بوده است ولی برخی دیگر معتقد هستند که، کاه لبه‌های تیزِ ترک‌های موجود در گِل خشک را کند کرده و مانع گسترش ترک‌ها می‌شود.

نمونه های تاریخی از کاربرد مواد مرکب در زمان های قدیم، فراوان است. فلسطینیان در ۸۰۰۰ سال قبل از میلاد، از نِی و حصیر در ساخت آجر و از حرارت خورشید برای عمل آوردن آن، استفاده می‌کردند. در ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد در خاورمیانه اولین ماده مرکب که در آن پلیمر به کار رفته بود، برای قیراندود کردن قایق‌ها استفاده شد [۱].

از سال ۱۹۶۰ میلادی با معرفی مواد مرکب پلیمری، این مواد مورد توجه صنایع قرار گرفتند. از این زمان، مواد مرکب به‌عنوان مواد مهندسی مناسب برای کاربردهای مختلف شامل قطعات اتومبیل، محصولات ورزشی، قطعات هوافضا، صنایع دریایی طراحی و ساخته شده‌اند. علت افزایش استفاده از مواد مرکب، افزایش آگاهی در مورد نحوه‌ی شکل‌دهی این مواد و افزایش رقابت در بازارهای جهانی برای ساختن قطعات سبک بود [۲].

توسعه ی کاربرد مواد مرکب تقریباً برای تمامی کارخانه های هوافضایی به عنوان یکی از اصلی ترین برنامه های تحقیقاتی و کاربردی در آمده است. با گذشت زمان و اطمینان از کیفیت مناسب این مواد، کاربرد این مواد در هواپیماهای غیرنظامی افزایش یافته، به گونه‌ای که حدود ۵۰ درصد از مواد سازنده ی هواپیمای بوئینگ ۷۸۷ مواد مرکب می باشند، هم چنین در تمامی هواپیماهای جنگنده که در چند دهه‌ی اخیر ساخته شده نیز به‌نحوی از مواد مرکب ا ستفاده شده است [۱].

۱-۱ تعریف ماده مرکب

مواد مرکب به موادی که حداقل از دو جزء ماتریس (زمینه) و تقویت کننده، تشکیل شده با شد، اطلاق می شود که این مواد در ابعاد در شت‌مقیاس[۱] یا ریزمقیاس[۲] در کنار هم قرار گرفته‌اند ولی در عین حال قابل حل در یکدیگر نیستند. در مواد مرکب معمولاً یک جزء به‌عنوان فاز تقویت کننده و جزءِ دیگر که فاز تقویت کننده را در بر می‌گیرد، نقش زمینه یا همان ماتریس را خواهد داشت [۲].

۱-۲ انواع مواد مرکب

چهار نوع مواد مرکب وجود دارد:

- مواد مرکب با الیاف که شامل الیاف و ماتریس است.
- مواد مرکب چندلایه که شامل لایه‌های مختلفی از مواد است.
- مواد مرکب ذره ای که از پخش قطعات ریز و یا مواد ذره‌ای در ماتریس حاصل می‌شوند.
- ماده‌ی مرکبی که شامل ترکیب سه نوع قبل است.

[۱] Macro

[۲] Micro

بدیهی است ترکیب دو یا چند ماده برای ساخت یک ماده مرکب، نسبت به استفاده از مواد فلزی و آلیاژی مرسوم هم‌چون آلومینیوم و فولاد به مراتب کار بیشتری می‌طلبد. مواد فلزی و آلیاژهای آن‌ها به‌طور کامل پاسخگوی نیازهای فناوری پیشرفته امروز نیستند. در بسیاری از موارد، تنها راه بدست آوردن محصولی با خواص مکانیکی و شیمیایی مطلوب، ترکیب چندین ماده‌ی متفاوت با یکدیگر است. به‌عنوان مثال، اجزاء و سازه‌های موجود در یک ماهواره یا سفینه‌ی فضایی، بایستی تحت تغییرات دمایی در محدوده‌ی ۱۶۰- تا ۹۳ درجه سانتی‌گراد پایداری ابعادی خود را حفظ کنند. لازمه‌ی این پایداری، استفاده از موادی با ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین است که تنها، مواد مرکبی هم‌چون گرافیت/اپوکسی[۱] می‌توانند چنین شرایطی را احراز نمایند. علاوه بر این، در بسیاری از موارد، کارایی و بازدهی مواد مرکب نسبت به سایر مواد بسیار بالاتر است [۳].

۱-۳ انواع اتصال‌ها

سازه‌های متشکل از مواد مرکب، از قطعات و اجزاء متعددی ساخته می‌شوند که با اتصال‌های مختلف به یکدیگر مرتبط می‌شوند و روز به روز کاربردشان در صنایع اتومبیل‌سازی و هوافضا افزایش می‌یابد. این اتصال‌ها معمولاً از نوع مکانیکی[۲] (پیچ و پرچ)، چسبی[۳] و جوشی[۴] هستند. اتصال‌های مکانیکی از نوع پیچی[۵]، در دسته اتصال‌های موقت و اتصال‌های چسبی و جوشی جزء اتصال‌های دائم هستند. اتصال‌ها یکی از معمول‌ترین عوامل شکست در سازه‌ها به حساب می‌آیند به‌طوری که حدود ۷۰ درصد شکست از این قسمت سازه شروع می‌شود. بنابراین، مورد توجه قرار دادن همه‌ی جنبه‌های اتصال در طراحی بسیار مهم است [٤].

[۱] Graphit/Epoxy

[۲] Mechanical joint

[۳] Adhesive joint

[٤] Weld joint

[٥] Bolt

۱-٤ اتصال‌های چسبی

اتصال‌های چسبی با ایجاد سطح تماس بزرگتر بین اجزاء، باعث می‌شود که توزیع تنش یکنواخت‌تری در طول ناحیه‌ی چسبی به‌وجود آید. هم‌چنین نسبت استحکام به وزن[۱] بالاتر، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و شکست خستگی و قیمت مناسب‌تر، از دیگر مزایای این نمونه از اتصال‌ها هستند.

مواد مرکب به تنش‌های موضعی حساس‌تر هستند، لذا به‌علت وجود تمرکز تنش در نزدیکی محل اتصال، استفاده از اتصال‌های مکانیکی محدود می شود. در حالی که در اتصال‌های چسبی، بار به شکل هموارتری از یک عضو به عضو دیگر در ناحیه اتصال منتقل می‌شود که چسب به‌عنوان یک واسطه، نقش انتقال بار را به عهده دارد. در اتصال‌های پیچی به‌علت وجود تمرکز تنش ناشی از وجود حفره و سوراخ، بیشینه‌ی بار کششی قابل اعمال بر لایه‌ها در یک اتصال ساده، تقریبا ۵۰ درصد مقاومت نهایی خودِ لایه‌ها است، در حالی که این مقدار در اتصال‌های چسبی در حدود ۸۰ درصد است [۵].

در حقیقت تفاوت اصلی اتصال چسبی با اتصال مکانیکی در این است که تمرکز تنش در اتصال چسبی به‌علت وجود سطح تماس بیشتر بین چسب و لایه‌های چسب‌شونده[۲]، کاهش یافته و توزیع تنش در ناحیه اتصال یکنواخت‌تر است. یکی دیگر از مزایای اتصال‌های چسبی در این است که چسب‌ها علاوه بر ایجاد اتصال، در بعضی از موارد وظیفه‌ی نشت‌بندی را نیز انجام می‌دهند. هم‌چنین هنگام استفاده از اتصال‌های مکانیکی، به‌علت ایجاد سوراخ‌کاری و بریده شدن الیاف، مقدار قابل توجهی از مقاومت قطعه از بین می‌رود، ولی در اتصال‌های چسبی احتیاج به سوراخ‌کاری نیست، اما در شرایطی که ضخامت اتصال زیاد بوده و بارهای وارده بر اتصال، خیلی بزرگ باشند، تنها راه ممکن استفاده از اتصال مکانیکی است.

در صورتی که بارگذاری خیلی بزرگ نباشد، برای اتصال مواد فلزی و غیرفلزی از اتصال‌های چسبی استفاده می‌شود. در هر اتصال یک لایه به‌عنوان لایه‌ی چسب می‌باشد که بین دو

---

[۱] Strength/weight ratio

[۲] Adherend

لایه‌ی چسب‌شونده قرارمی‌گیرد، بنابراین چسب ماده‌ای است که از آن برای اتصال سطوح مواد به یکدیگر استفاده می‌شود. از دید ریز ساختاری، استحکام چسب به چسبندگی[۱] میان لایه‌های مختلف و میزان پیوستگی[۲] بین مولکول‌های خود چسب بستگی دارد.

۱-۵ هدف پایان‌نامه

برای تخمین مقاومت اتصال، به نحوه‌ی توزیع تنش در اتصال نیاز است. در این تحقیق ورق‌های چسب شونده به صورت ارتوتروپیک[۳] عمومی و لایه‌ی چسب به صورت همسانگرد، در نظر گرفته شده‌اند. این اتصال، تحت گشتاور خمشی قرار داشته و رفتار مواد تشکیل دهنده‌ی آن‌ها در محدوده‌ی الا ستیک خطی در نظر گرفته شده ا ست. هدف از انجام این پژوهش، یافتن توزیع تنش بر شی[٤] و تنش نا شی از تورق[٥] در طول ناحیه‌ی چ سبی می‌با شد. در حل تحلیلی، از تئوری ورق مرتبه اول ا ستفاده شده ا ست، در این تئوری فرض شده ا ست که خط عمود بر سطح میانی ورق پس از اعمال بار، عمود باقی نمی‌ماند ($\gamma_{xz} \neq 0$). توزیع تنش در راستای ضخامت لایه‌ی چسب به صورت ثابت در نظر گرفته شده ا ست. هم‌چنین در هر مرحله نتایج بد ست آمده از حل تحلیلی با نتایج حاصل از روش عددی به کمک نرم‌افزار انسیس[٦] مقایسه شده است.

۱-٦ ساختار پایان‌نامه

در فصل اول پایان‌نامه، مقدمه‌ای در مورد مواد مرکب و ضرورت محا سبه‌ی توزیع تنش در این مواد، بیان شده ا ست. در ف صل دوم پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی ات صال‌های چ سبی

---

[۱] Adhesion

[۲] Cohesion

[۳] Orthotropic

[٤] Shear Stress

[٥] Peel Stress

[٦] ANSYS