

تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

گرایش سازه‌های هوایی

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان

تحلیل و بهینه سازی لایه چینی و هندسه گشودگی دایروی بر روی
کمانش صفحات تخت کامپوزیتی در سازه‌های هوایی

تهیه کننده

محمد امین کتیرائی

استاد راهنما

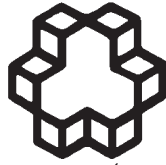
دکتر علی مظفری

استاد مشاور

دکتر مهناز ذاکری

تابستان ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

گرایش سازه‌های هوایی

تأییدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان :

تحلیل و بهینه‌سازی لایه‌چینی و هندسه گشودگی دایروی
بر روی کمانش صفحات تخت کامپوزیتی در سازه‌های هوایی

توسط آقای محمد امین کتیراء، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته هوافضا گرایش سازه‌های هوایی در تاریخ ۱۳۹۱/۰۶/۲۹ مورد تأیید قرار می‌دهند.

امضاء	جناب آقای دکتر علی مظفری	۱- استاد راهنمای اول
امضاء	سرکار خانم دکتر مهناز ذاکری	۲- استاد مشاور
امضاء	جناب آقای دکتر مهران میرشمس	۳- ممتحن
امضاء	جناب آقای دکتر سعید ایرانی	۴- ممتحن
امضاء	جناب آقای دکتر مهران میرشمس	۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده

اظهارنامه دانشجو

اینجانب محمد امین کتیراء دانشجوی کارشناسی ارشد رشته هوافضا گرایش سازه‌های هوایی دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

تحلیل و بهینه‌سازی لایه‌چینی و هندسه گشودگی دایروی
بر روی کمانش صفحات تخت کامپوزیتی در سازه‌های هوایی

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر علی مظفری و مشاوره استاد محترم سرکار خانم دکتر مهناز ذاکری، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

amin.katirae@gmail.com

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری

به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده

هوفاضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز

نمی باشد.

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند و در کلیه مراحل زندگی به خصوص در امر تحصیل پشتیبان و مشوق من بوده‌اند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم.

و خواهران عزیزم

که حضورشان مایه دلگرمی من است.

تقدیر و تشکر

پس از سپاس و ثنای بی حد بر آستان صفات بی همتای احدیت که در کمال رأفت و در نهایت عطوفت رخصت اتمام این پایان نامه را به من عطا فرمود. نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم و سراپیم، کم گفته‌ام.

از کلیه عزیزانی که اینجانب را در انجام این پروژه یاری نمودند، به خصوص از اساتید عزیزم جناب آقای دکتر علی مظفری و سرکار خانم مهناز ذاکری، و دوست عزیزم جناب آقای بهروز حسین پور که دلسوزانه با راهنمایی‌های بسیار مفیدشان مشوق و راهنمای من بودند، کمال تشکر و قدرانی را دارم و امیدوارم که خداوند منان بر توفیقات روز افزونشان بیفزاید.

چیدم گلی ز باغ ادب تا بروز عید
در بارگاه میر ادب پرور آورم
حیف است با خسان گل دانش کنی نثار
من گل نثار مردم دانشور آورم

شهریار

محمد امین کتیرائی

تابستان ۹۱

چکیده

صفحات دارای گشودگی در سازه‌های هوایی به طور عمده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل ضخامت کم آن‌ها، پدیده کمانش عامل مهمی در طراحی این صفحات می‌باشد. در این تحقیق پس از معرفی گشودگی‌ها، علت‌های ایجاد و دسته بندی آن‌ها، به بررسی اثرات اندازه گشودگی دایروی مرکزی، لایه‌چینی و ارتفاع لبه تقویت کننده بر روی کمانش تحت بار فشاری تک محوره پرداخته شده است. یکی از روش‌های مورد استفاده در طراحی صفحات نازک، استفاده از تقویت کننده‌های یکپارچه بوده که در نمونه‌های مورد بررسی، به صورت لبه به آن‌ها اضافه گردیده است. این بررسی از طریق روش‌های المان محدود و تست تجربی، انجام می‌پذیرد. همچنین پارامتر لایه‌چینی، اندازه گشودگی و ارتفاع لبه تقویت کننده را به عنوان متغیر مد نظر قرار داده و تاثیرات آن‌ها بر بار کمانش بررسی می‌شود.

پس از حل نمونه‌هایی از جنس کربن-اپوکسی، در نرم افزار المان محدود Ansys، (حدوداً ۳۵۰ نمونه)، محدوده بهینه تغییرات بار کمانشی به ازای اندازه لبه تقویت کننده در گشودگی‌ها و لایه‌چینی‌های مختلف استخراج می‌شود. لازم به ذکر است که قبل از ورود به حل المان محدود نمونه‌های مختلف، اعتبار سنجی نتایج نرم افزار Ansys با نتایج حاصل از تحقیقات دیگران روی پاسخ کمانشی صفحه کامپوزیتی دارای گشودگی و بدون گشودگی مورد بررسی قرار گرفته، که در این مورد نیز نزدیکی خوبی بین نتایج وجود دارد.

در مرحله دوم تحقیق، با انتخاب یک گشودگی مرکزی با اندازه ثابت، ۵۴ نمونه در محدوده ارتفاع بهینه از جنس شیشه- اپوکسی در سه لایه‌چینی مختلف به روش لایه‌چینی دستی درون قالب طراحی شده، ساخته می‌شود. پس از آماده سازی، پخت نمونه‌ها و طراحی فیکسچر لازم، تست تجربی کمانش این نمونه‌ها تحت بار فشاری تک محوره، انجام گرفته و نتایج آن استخراج می‌گردید. همچنین کوپن‌های استاندارد جهت استخراج مشخصه‌های مکانیکی ساخته شده و هر یک بر اساس استاندارد مربوطه تست می‌گردند.

این مطالعه نشان داد که مقدار بهینه‌ای برای پارامترهای متغیر مذکور وجود دارد که در آن‌ها، مقاومت کمانشی صفحات تقویت شده مرکب، ماکزیمم خواهد بود.

کلمات کلیدی:

گشودگی، سوراخ، کمانش، تست تجربی، تحلیل المان محدود، گشودگی دایروی مرکزی، طراحی قالب و فیکسچر.

فهرست مطالب

صفحه

فهرست

مقدمه.....	۱
فصل اول: مبانی کار و مروری بر اقدامات انجام شده.....	۴
۱-۱- تاریخچه و کاربرد مواد مرکب.....	۴
۲-۱- طبقه بندی مواد مرکب.....	۵
۳-۱- اجزا تشکیل دهنده مواد مرکب.....	۵
۱-۳-۱- الیاف.....	۵
۲-۳-۱- ماتریسها (رزین یا چسب).....	۹
۴-۱- رفتار مواد مرکب.....	۹
۱-۴-۱- تک لایهها.....	۹
۲-۴-۱- چند لایهها.....	۹
۵-۱- کاربرد مواد کامپوزیتی در صنایع هوافضا.....	۱۰
۶-۱- معرفی گشودگیها (حفرهها یا سوراخها) [۵].....	۱۱
۷-۱- کمانش.....	۱۵
۱-۷-۱- روشهای مقاومسازی صفحات در برابر کمانش.....	۱۵
۲-۷-۱- رفتار کمانشی و پس کمانشی صفحهها.....	۱۷
۸-۱- اقدامات صورت گرفته تاکنون.....	۱۸
فصل دوم: آنالیز المان محدود.....	۲۸
۱-۲- صحت سنجی.....	۲۹
۱-۱-۲- انتخاب نرم افزار المان محدود.....	۳۰
۲-۱-۲- مقایسه و نتیجه گیری صحت سنجی.....	۳۳
۲-۲- بررسی یک مدل تست شده.....	۳۵
۳-۲- آنالیز المان محدود نمونههای تست شده از جنس کربن-اپوکسی.....	۳۶

۳۷.....	۱-۳-۲- خصوصیات هندسی صفحه
۳۸.....	۲-۳-۲- مدل سازی المان محدود نمونه‌های کربن-اپوکسی
۳۹.....	۳-۳-۲- نتایج بدست آمده از آنالیز برای کربن - اپوکسی
۳۹.....	۲-۳-۳-۱- بدون حضور گشودگی
۴۰.....	۲-۳-۳-۲- با حضور گشودگی و ارتفاع لبه صفر (صفحه ساده)
۴۱.....	۲-۳-۳-۳- با حضور گشودگی و ارتفاع لبه ۴ میلی‌متر
۴۲.....	۲-۳-۳-۴- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۷ میلی‌متر
۴۳.....	۲-۳-۳-۵- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۱۲ میلی‌متر
۴۴.....	۲-۳-۳-۶- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۲۰ میلی‌متر
۴۵.....	۲-۳-۳-۷- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۲۵ میلی‌متر
۴۶.....	۲-۳-۳-۸- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۳۰ میلی‌متر
۴۷.....	۲-۳-۳-۹- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۴۰ میلی‌متر
۴۸.....	۲-۳-۳-۱۰- با حضور حفره و ارتفاع لبه ۵۰ میلی‌متر
۴۹.....	۲-۳-۴- تغییرات اندازه‌ی لبه در حضور گشودگی‌ها با اندازه‌ی ثابت
۵۳.....	۲-۳-۵- مقایسه نمودارها و نسبت پیشرفت بار کمانش با افزایش ارتفاع لبه
۵۶.....	۲-۴- آنالیز المان محدود نمونه‌ها برای جنس شیشه- اپوکسی
۵۷.....	۲-۴-۱- نتایج المان محدود برای شیشه- اپوکسی از رده S

۶۰..... فصل سوم: ساخت نمونه‌ها و تست

۶۱.....	۱-۳- کلیات مسئله
۶۱.....	۲-۳- خصوصیات هندسی و وضعیت لایه‌چینی نمونه‌ها
۶۲.....	۳-۳- مواد
۶۳.....	۳-۳-۱- کنترل پارچه‌های تهیه شده
۶۴.....	۳-۴- ساخت قسمت‌های L شکل به روش لایه‌گذاری خیس یا لایه‌گذاری دستی
۶۶.....	۳-۵- طراحی قالب
۶۶.....	۳-۵-۱- معرفی قالب طراحی شده
۶۹.....	۳-۶- مراحل ساخت نمونه‌های اصلی به وسیله‌ی قالب
۷۱.....	۳-۶-۱- کنترل‌های انجام شده در حین لایه‌چینی

۷۱	۷-۳- برش و تریم قطعات در اندازه‌های مورد نیاز.....
۷۴	۸-۳- سوراخ کاری نمونه‌ها.....
۸۱	۹-۳- ساخت نمونه‌های استاندارد و تست
۸۲	۱-۹-۳- محاسبه خصوصیات مکانیکی.....
۸۲	۱-۱-۹-۳- آزمایشات کششی و فشاری.....
۸۷	۱۰-۳- پخت نمونه‌ها.....
۹۰	۱۱-۳- تست نمونه‌ها
۹۰	۱-۱۱-۳- بارگذاری و شرایط مرزی.....
۹۳	۲-۱۱-۳- نتایج تست نمونه‌های L شکل

فصل چهارم: نتایج و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۹۹

۱۰۰	۱-۴- نتایج.....
۱۰۲	۲-۴- پیشنهادات.....

پیوست

۱۰۴	پیوست-الف.....
۱۱۴	پیوست-ب.....
۱۱۶	پیوست-ج.....

مراجع ۱۱۸

فهرست شکل‌ها

صفحه

شکل

- شکل ۱-۱: اهمیت نسبی توسعه مواد در طول تاریخ [۱] ۴
- شکل ۲-۱: نمودار تنش- کرنش برای الیاف مختلف و رزین [۳] ۶
- شکل ۳-۱: برخی از انواع الیاف شیشه موجود ۸
- شکل ۴-۱: نمونه‌ای از ترکیب قرارگیری لایه‌ها در چند لایه‌ها [۲] ۱۰
- شکل ۵-۱: روند به‌کارگیری کامپوزیت‌ها در هواپیماهای مسافربری [۴] ۱۰
- شکل ۶-۱: حفره کوچک و متوسط [۵] ۱۲
- شکل ۷-۱: برش تیر با اعضای قاب بندی و دابلر اطراف یک حفره [۵] ۱۳
- شکل ۸-۱: گشودگی‌ها در ریب و تیر [۶] ۱۴
- شکل ۹-۱: انواع حفره ۱۴
- شکل ۱۰-۱: رفتار کمانشی صفحات [۱۱] ۱۷
- شکل ۱۱-۱: مقایسه رفتار کمانش و پس کمانشی صفحه، ستون باریک و استوانه جدار نازک [۱۱] ۱۸
- شکل ۱-۲: المان Shell 91 [۵۹] ۳۱
- شکل ۲-۲: مدل دارای گشودگی بارگذاری شده به همراه قیود تکیه گاهی ۳۱
- شکل ۳-۲: مدل بدون گشودگی بارگذاری شده به همراه قیود تکیه گاهی ۳۲
- شکل ۴-۲: شکل مود اول کمانش و مقدار آن برای صفحه دارای گشودگی ۳۲
- شکل ۵-۲: شکل مود اول کمانش و مقدار آن برای صفحه بدون گشودگی ۳۳
- شکل ۶-۲: هندسه مدل [۴۸] ۳۵
- شکل ۷-۲: نمای شماتیک از مدل‌های مورد آنالیز ۳۷
- شکل ۸-۲: مدل بارگذاری شده به همراه قیود تکیه گاهی ۳۸
- شکل ۱-۳: نمایی شماتیک از هندسه نمونه‌های تست ۶۱
- شکل ۲-۳: الیاف شیشه تک جهت بکار گرفته شده در ساخت نمونه‌ها ۶۳
- شکل ۳-۳: نمونه ساخته شده جهت بدست آوردن اطلاعات ساختی ۶۵
- شکل ۴-۳: اجزای قالب‌های طراحی شده ۶۷
- شکل ۵-۳: نمای داخلی قالب‌های طراحی شده ۶۷
- شکل ۶-۳: قالب پس از بسته شدن ۶۷

- شکل ۳-۷: فوم‌های استخراج شده از قالب‌ها جهت کنترل قالب ۶۸
- شکل ۳-۸: فوم‌های استخراج شده از قالب‌ها جهت کنترل قالب ۶۹
- شکل ۳-۹: خیس کردن الیاف و آماده سازی جهت ورود به قالب ۷۰
- شکل ۳-۱۰: دستگاه‌های لازم برای برش کامپوزیت‌ها ۷۲
- شکل ۳-۱۱: شابلون‌های آلومینیومی ساخته شده برای اندازه‌گذاری بر روی نمونه‌ها ۷۳
- شکل ۳-۱۲: دستگاه تراش و سمباده زن متصل شده به آن ۷۳
- شکل ۳-۱۳: نمونه تریم شده نهایی ۷۴
- شکل ۳-۱۴: سوراخ ایجاد شده به وسیله گردبر ۷۵
- شکل ۳-۱۵: سوراخ ایجاد شده به وسیله تیغ فرز ۷۵
- شکل ۳-۱۶: شکل جیگ و نحوه قرارگیری نمونه در آن ۷۶
- شکل ۳-۱۷: نحوه قرارگیری جیگ و قطعه بر روی میز کار دستگاه فرز ۷۷
- شکل ۳-۱۸: کلیه نمونه‌های ساخته شده ۸۱
- شکل ۳-۱۹: نمایی از کوپن استاندارد جهت تست ۸۳
- شکل ۳-۲۰: کوپن‌های استاندارد ساخته شده جهت تست ۸۴
- شکل ۳-۲۱: نمونه کششی ساخته شده، نصب شده در دستگاه و نوع شکست آن ۸۶
- شکل ۳-۲۲-الف: نمونه‌های غیر قابل قبول [۶۶] ۸۶
- شکل ۳-۲۲-ب: نمونه‌های قابل قبول [۶۶] ۸۶
- شکل ۳-۲۳: نحوه قرارگیری نمونه‌ها و کوپن‌ها درون کوره ۸۸
- شکل ۳-۲۴: کوره بکار رفته برای پخت قطعات ۸۸
- شکل ۳-۲۵: نحوه تغییرات دما در پخت ۸۹
- شکل ۳-۲۶: قرارگیری صفحات ۸ میلی‌متری فیکسچر بر روی دستگاه وایرکات ۹۰
- شکل ۳-۲۷: اجزای فیکسچر به همراه یک نمونه آماده شده جهت تست ۹۱
- شکل ۳-۲۸: نمایی از نحوه قرارگیری مدل مورد تست در فیکسچر ۹۱
- شکل ۳-۲۹: نمایی از دستگاه اینسترون و مدل قرار گرفته در آن ۹۲
- شکل ۳-۳۰: مراحل کمانش تا رسیدن به شکست برای نمونه S6 ۹۴
- شکل ۳-۳۱: شکست قطعات L شکل ۹۸
- شکل ب-۱- کمانش نمونه از جنس کربن-اپوکسی در لایه‌چینی [۰/۰/۰] ، $\frac{h}{b} = 0.2$ و $\frac{d}{b} = 0.2$ ۱۱۴

فهرست

- شکل ب-۲-کمانش نمونه از جنس کربن-اپوکسی در لایه چینی [۰/۰/۰] ، $\frac{h}{b}=0.2$ و $\frac{d}{b}=0.5$ ۱۱۴
- شکل ب-۳-کمانش نمونه از جنس کربن-اپوکسی در لایه چینی [۰/۰/۰] ، $\frac{h}{b}=0.3$ و $\frac{d}{b}=0.2$ ۱۱۵
- شکل ج-۱-کمانش نمونه از جنس شیشه-اپوکسی در لایه چینی [۰/۰/۰] ، $\frac{h}{b}=0.2$ و $\frac{d}{b}=0.2$ ۱۱۶
- شکل ج-۲-کمانش نمونه از جنس شیشه-اپوکسی در لایه چینی [۴۵/۴۵/۴۵] ، $\frac{h}{b}=0.2$ و $\frac{d}{b}=0.2$ ۱۱۶
- شکل ج-۳-کمانش نمونه از جنس شیشه-اپوکسی در لایه چینی [۰/۰/۰] ، $\frac{h}{b}=0.2$ و $\frac{d}{b}=0.2$ ۱۱۷

فهرست جداول

صفحه	جدول
۶	جدول ۱-۱: مزایا و معایب الیاف کربن [۲].....
۷	جدول ۲-۱: مزایا و معایب الیاف شیشه [۲].....
۱۹	جدول ۳-۱: اقدامات صورت گرفته بر روی کمانش سازه‌های کامپوزیتی توسط افراد مختلف [۱۲].....
۱۹	۳-۱-الف-کمانش.....
۲۰	۳-۱-ب-پس از کمانش.....
۳۰	جدول ۱-۲: مشخصات مکانیکی گرافیت-اپوکسی T300/5208 [۵۶].....
۳۴	جدول ۲-۲: نتایج حاصل از صحت سنجی.....
۳۴	جدول ۳-۲: حساسیت سنجی نیروی کمانش نسبت به تعداد المان‌ها برای نمونه دارای گشودگی.....
۳۴	جدول ۴-۲: نتایج حاصل از صحت سنجی سینگ و کومار [۵۶].....
۳۵	جدول ۵-۲: مشخصات مکانیکی ماده‌ی استفاده شده [۴۸].....
۳۷	جدول ۶-۲: دسته بندی مدل‌ها بدون حضور گشودگی.....
۳۷	جدول ۷-۲: دسته بندی مدل‌ها با حضور گشودگی.....
۵۶	جدول ۸-۲: خصوصیات مکانیکی ماده از جنس اپوکسی - S-glass.....
۶۲	جدول ۱-۳: مشخصات هندسی، لایه‌چینی و گشودگی نمونه‌های ساخته شده.....
۶۴	جدول ۲-۳: مزایا و معایب اصلی لایه چینی دستی [۲].....
۷۸	جدول ۳-۳-الف- وزن نمونه‌های بدون گشودگی با ارتفاع لبه تقویت کننده‌ی ۲۰ میلی‌متر.....
۷۸	جدول ۳-۳-ب- وزن نمونه‌های دارای گشودگی با ارتفاع لبه تقویت کننده‌ی ۲۰ میلی‌متر.....
۷۹	جدول ۳-۴-الف- وزن نمونه‌های بدون گشودگی با ارتفاع لبه تقویت کننده‌ی ۲۵ میلی‌متر.....
۷۹	جدول ۳-۴-ب- وزن نمونه‌های دارای گشودگی با ارتفاع لبه تقویت کننده‌ی ۲۵ میلی‌متر.....
۸۰	جدول ۳-۵-الف- وزن نمونه‌های بدون گشودگی با ارتفاع لبه تقویت کننده‌ی ۳۰ میلی‌متر.....
۸۰	جدول ۳-۵-ب- وزن نمونه‌های دارای گشودگی با ارتفاع لبه تقویت کننده‌ی ۳۰ میلی‌متر.....
۸۳	جدول ۳-۶: انواع تست‌های مختلف بر اساس استاندارد ASTM.....
۸۳	جدول ۳-۷: ابعاد پیشنهادی نمونه‌ها بر اساس استاندارد [۶۶ و ۶۷].....
۸۷	جدول ۳-۸: نتایج بدست آمده از نمونه‌های استاندارد مورد تست.....
۸۹	جدول ۳-۹: تغییرات دما بر حسب زمان در پخت.....

فهرست

- جدول الف-۱: تغییرات بار کمانش بدون حضور گشودگی با تغییرات ارتفاع لبه ۱۰۴
- جدول الف-۲: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه صفر ۱۰۵
- جدول الف-۳: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه صفر ۱۰۶
- جدول الف-۴: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه صفر ۱۰۷
- جدول الف-۵: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه ۱۲ میلی‌متر ۱۰۸
- جدول الف-۶: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه ۲۰ میلی‌متر ۱۰۹
- جدول الف-۷: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه ۲۵ میلی‌متر ۱۱۰
- جدول الف-۸: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه ۳۰ میلی‌متر ۱۱۱
- جدول الف-۹: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه ۴۰ میلی‌متر ۱۱۲
- جدول الف-۱۰: تغییرات بار کمانش با حضور حفره با ارتفاع لبه ۵۰ میلی‌متر ۱۱۳

فهرست نمودارها

نمودار	صفحه
نمودار ۱-۲: بار ماکزیمم وضعیت‌های مختلف	۳۶
نمودار ۲-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه و لایه‌چینی در صفحه کامپوزیتی بدون گشودگی بر کمانش	۳۹
نمودار ۳-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۰
نمودار ۴-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.04$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۱
نمودار ۵-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.07$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۲
نمودار ۶-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.12$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۳
نمودار ۷-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.20$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۴
نمودار ۸-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.25$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۵
نمودار ۹-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.3$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۶
نمودار ۱۰-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.4$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۷
نمودار ۱۱-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی گشودگی در لایه‌چینی مختلف با $(h/b)=0.5$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۸
نمودار ۱۲-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.05$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۹
نمودار ۱۳-۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.1$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش	۴۹

فهرست

- نمودار ۲-۱۴: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.2$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش ۵۰
- نمودار ۲-۱۵: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.3$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش ۵۰
- نمودار ۲-۱۶: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.4$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش ۵۱
- نمودار ۲-۱۷: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.5$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش ۵۱
- نمودار ۲-۱۸: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.6$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش ۵۲
- نمودار ۲-۱۹: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه در لایه‌چینی مختلف با $(d/b)=0.05$ در صفحه کامپوزیتی بر کمانش ۵۳
- نمودار ۲-۲۰: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه با $(d/b)=0.1$ در نسبت $P_{cr}/(P_{cr_h=0,d/b=0.1})$ ۵۳
- نمودار ۲-۲۱: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه با $(d/b)=0.2$ در نسبت $P_{cr}/(P_{cr_h=0,d/b=0.2})$ ۵۴
- نمودار ۲-۲۲: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه با $(d/b)=0.3$ در نسبت $P_{cr}/(P_{cr_h=0,d/b=0.3})$ ۵۴
- نمودار ۲-۲۳: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه با $(d/b)=0.4$ در نسبت $P_{cr}/(P_{cr_h=0,d/b=0.4})$ ۵۵
- نمودار ۲-۲۴: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه با $(d/b)=0.5$ در نسبت $P_{cr}/(P_{cr_h=0,d/b=0.5})$ ۵۵
- نمودار ۲-۲۵: تاثیر افزایش اندازه‌ی لبه با $(d/b)=0.6$ در نسبت $P_{cr}/(P_{cr_h=0,d/b=0.6})$ ۵۶
- نمودار ۲-۲۶: نیروهای کمانش برای نمونه با ارتفاع لبه ۲۰ میلی‌متر ۵۷
- نمودار ۲-۲۷: نیروهای کمانش برای نمونه با ارتفاع لبه ۲۵ میلی‌متر ۵۸
- نمودار ۲-۲۸: نیروهای کمانش برای نمونه با ارتفاع لبه ۳۰ میلی‌متر ۵۹
- نمودار ۳-۱: تغییرات نیروی محوری به جابجایی محوری برای مدل M14 ۹۳
- نمودار ۳-۲: تغییر شیب نمودار در نقطه کمانش ۹۳
- نمودار ۳-۳: نیروهای کمانش برای نمونه‌های تست شده با ارتفاع لبه ۲۰ میلی‌متر ۹۵
- نمودار ۳-۴: نیروهای کمانش برای نمونه‌های تست شده با ارتفاع لبه ۲۵ میلی‌متر ۹۶
- نمودار ۳-۵: نیروهای کمانش برای نمونه‌های تست شده با ارتفاع لبه ۳۰ میلی‌متر ۹۷

فهرست نشانه‌ها و علائم

مدول یانگ در راستای الیاف E_{11}

مدول یانگ در راستای عمود الیاف E_{22}

مدول یانگ در راستای ضخامت E_{33}

ضریب پواسون در محور مواد $\nu_{12} \nu_{23} \nu_{13}$

مدول برشی در محور مواد $G_{12} G_{23} G_{13}$

نیروی اعمالی محوری N_X

نیروی کمانش محوری N_{cr}

تنش کمانش محوری σ_{cr}

تنش اعمالی محوری σ

جابجایی محوری u

جابجایی بیرون صفحه‌ای w

طول صفحه a

عرض صفحه b

ضخامت نمونه t

ارتفاع لبه تقویت کننده H

نیروی کمانشی بی‌بعد شده \bar{N}

مقدمه

نیاز به مقاومت بالا با حداقل وزن، زمینه‌های تحقیقاتی فراوانی را در طراحی و بهینه سازی اجزای سازه‌های هوایی ایجاد کرده است. استفاده از مواد کامپوزیتی در صنعت هوایی راه حلی برای کاهش وزن بوده و در این راه پیشرفت‌های چشمگیری نیز حاصل شده است. این مواد امروزه در قسمت‌های مختلف یک وسیله پرنده بکار گرفته شده و حتی در بعضی موارد، سازه آن کاملاً از مواد مرکب ساخته می‌شود.

کاربرد وسیع این مواد در قسمت‌های مختلف وسایل هوافضایی مثل: کف، سقف و بدنه پرنده، ریب‌ها و پانل‌های مختلف، توجه بسیاری از محققین را به طراحی آن جلب کرده است. از آنجا که در جایگاه‌های مختلف، بارهای گوناگونی به اعضاء وارد می‌شود، لذا بررسی و تحلیل کامپوزیت‌ها تحت انواع بارگذاری از مقولات مهم در طراحی سازه‌های هوایی است.

نیاز به کاهش وزن، دسترسی جهت بازبینی، تعمیر، تعویض قطعه، عبور لوله و سیم، ایجاد پنجره یا درب و امثال آن، طراح را ملزم به ایجاد سوراخ‌ها یا گشودگی‌هایی با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف در سازه می‌کند. این امر خود بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید و کار طراحی را مشکل‌تر می‌کند. روش تحلیلی دقیق و جامعی برای آنالیز صفحات کامپوزیتی دارای سوراخ وجود ندارد. به محض ایجاد چنین حفره‌هایی در یک پوسته‌ی تحت بار، می‌بایست سازه مجاور قوی‌تری جهت تامین مسیرهای کمکی به منظور انتقال بارها معرفی گردد و یا از توانایی سازه بدون حضور تقویت کننده، اطمینان حاصل شود.

در واقع حضور حفره‌ها نیاز به تحلیل‌های وقت‌گیر و پردردسر برای طراح دارد؛ به خصوص باید کمانش سازه با ایجاد حفره‌ها در نظر گرفته شده و پاسخ‌های قانع کننده‌ای برای آن‌ها ارائه شود تا از ایمنی سازه اطمینان حاصل گردد. گروهی از محققین روش‌های تقریبی را ارائه نموده و عده کثیری نیز به روش‌های المان محدود مطالعاتی را انجام داده‌اند. از آنجا که در جایگاه‌های مختلف، بارهای گوناگونی به اعضاء وارد می‌شود، لذا بررسی و تحلیل کامپوزیت‌ها تحت انواع بارگذاری و بررسی رفتار کمانشی از مقولات مهم در طراحی سازه‌های هوایی است.

با توجه به نوع قطعه و بار اعمالی بر آن رفتار کمانشی متفاوت بوده و اولویت بندی خواهند شد، گروهی از آن‌ها اجازه کمانش نداشته و در بعضی دیگر به بررسی و تحلیل رفتار پس از کمانش آن‌ها پرداخته می‌شود. به عنوان مثال در صفحات جدار نازک بحث کمانش بسیار مهم‌تر از حد تسلیم و شکست صفحه می‌باشد. چون صفحات جدار نازک قبل از رسیدن به حد تسلیم دچار کمانش شده و باربری واقعی خود را از دست می‌دهند. لذا، آنالیز کمانش ضروری و مهم است.