بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه هرمزگان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مکانیک- ساخت و تولید

عنوان:

بررسی استحکام پانل‌های ساندویچی با هسته پرشده با فوم

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی میرزایی خلیل‌آبادی

استاد مشاور:

دکتر محسن لوح‌موسوی

نگارش:

حمید رضا ریاحی

بهمن‌ماه ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعه‌ها و
نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان
نامه متعلق به دانشگاه هرمزگان است.

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

که وجودم برایشان سراسر زحمت و وجودشان برایم سراسر رحمت است و

روان پاک شهیدان

چکیده:

با توجه به ضرورت سبک‌سازی اجسام و سازه‌ها، تحقیق بر روی مواد با استحکام[۱] بالا و چگالی کم بسیار مورد توجه قرارگرفته است. مواد مرکب، موادی با نسبت بالای استحکام به وزن می‌باشند. کاربرد مواد مرکب بسیار گسترده بوده و دارای انواع مختلفی می‌باشند، به عنوان مثال: مواد مرکب تقویت شده با الیاف و مواد مرکب چندلایه.

یکی از این دسته‌ها، پانل‌های ساندویچی هستند که از هسته‌های مختلفی تشکیل شده‌اند. به عنوان مثال پانل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری[۲] آلومینیومی در صنایع هوافضا کاربرد بسیار زیادی دارد. معمولاً پانل‌های ساندویچی در ابتدا دارای هسته فوم تنها بودند و به مرور زمان و با پیشرفت علم، تلاش‌هایی برای توسعه ساختارهای جدید هسته هم‌چون لانه‌زنبوری، کرکره‌ای[۳] و غیره صورت گرفته است که عملکرد خوبی در مقایسه با هسته‌های فوم سنتی دارند.

در این پایان‌نامه برای اولین بار، تاثیر فوم در افزایش استحکام پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای مورد بررسی قرارگرفت، که برای این منظور پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم تحت آزمون‌های فشار، خمش سه نقطه و ضربه به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفتند. پس از انجام آزمون‌های مذکور، استحکام پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم نسبت به پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم افزایش چشمگیری داشت.

کلمات کلیدی: مواد مرکب، پانل ساندویچی، هسته کرکره‌ای، هسته پرشده با فوم، استحکام

۱ - Strength

۲ - Honeycomb

۳ - Corrugate

سپاس **خداوند منان** را که رحمت بی دریغش را بی هیچ منتی بر من ارزانی داشت و مرا از دریای بیکران علم و معرفت خود جرعه ای نوشاند و طعم شیرین دانستن را به من چشاند و فیض گام نهادن در مسیر علم و دانش را عطا فرمود.

صمیمانه ترین سپاس ها را تقدیم میکنم به:

خانواده عزیزم که با صبر و از خودگذشتگی زمینه ی پیشرفت مرا فراهم کردند و در همه حال یار و همراهم بودند.

استاد راهنمای بزرگوارم **جناب آقای دکتر محمد علی میرزایی** و هم چنین استاد مشاور گرانقدرم

جناب آقای دکتر محسن لوح موسوی که همواره از رهنمودهای ارزشمندشان بهره بردم.

و تمامی اساتید ارجمندی که در محضرشان کسب علم نمودم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده ---------- أ

فهرست جداول ---------- ذ

فهرست اشکال ---------- ر

فصل اول: مقدمه ---------- ۱

۱-۱- کاهش وزن سازه توسط پانل‌های ساندویچی ---------- ۲

۱-۲- مرور تحقیق‌های انجام شده در زمینه آسیب فشار و ضربه بر پانل‌های ساندویچی ---------- ۲

۱-۳- مباحث مطرح شده در سایر فصل‌ها ---------- ۳

فصل دوم: مواد مرکب و آزمون‌های بررسی استحکام ---------- ۵

۲-۱- مواد مرکب ---------- ۶

۲-۲- اجزای تشکیل دهنده مواد مرکب ---------- ۸

۲-۲-۱- الیاف ---------- ۸

۲-۲-۲- ماتریس ---------- ۸

۲-۳- مواد به کار رفته در هسته ---------- ۹

۲-۳-۱- لانه‌زنبوری‌ها ---------- ۹

۲-۳-۲- فوم پلی‌اورتان ---------- ۱۱

۲-۴- مواد به کار رفته در رویه‌ها ---------- ۱۱

۲-۵- چسب‌ها ---------- ۱۲

۲-۵-۱- انتخاب چسب ---------- ۱۲

۲-۵-۲- آماده‌سازی سطح ---------- ۱۲

۲-۶- مزیت‌های مواد مرکب ---------- ۱۳

۲-۶-۱- مزیت‌های هزینه‌ای---------- ۱۳
۲-۶-۲- مزیت‌های وزن در عملکرد سازه---------- ۱۳
۲-۷- کاربردهای مواد مرکب---------- ۱۳
۲-۷-۱- صنایع حمل‌ونقل---------- ۱۴
۲-۷-۲- صنایع هوافضا---------- ۱۴
۲-۷-۳- صنایع دریایی---------- ۱۵
۲-۸- پانل‌های ساندویچی---------- ۱۶
۲-۹- مزایای پانل ساندویچی---------- ۱۶
۲-۱۰- کاربردهای پانل ساندویچی---------- ۱۶
۲-۱۱- انواع سازه‌های ساندویچی---------- ۱۷
۲-۱۱-۱- هسته پیوسته و مقاوم---------- ۱۷
۲-۱۱-۲- هسته لانه‌زنبوری---------- ۱۷
۲-۱۱-۳- هسته شبکه‌ای---------- ۱۸
۲-۱۲- پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای---------- ۱۹
۲-۱۳-آزمایش فشار ASTM E-۹---------- ۲۰
۲-۱۳-۱- شرایط نمونه‌ها در آزمایش---------- ۲۱
۲-۱۳-۲- ابعاد نمونه---------- ۲۱
۲-۱۴- آزمون استاندارد برای تعیین خصوصیت‌های فشاری هسته ساندویچی---------- ۲۲
۲-۱۴-۱- هدف---------- ۲۲
۲-۱۴-۲- اهمیت و استفاده---------- ۲۲
۲-۱۴-۳- دستگاه آزمون---------- ۲۳
۲-۱۴-۴- نمونه‌های آزمون---------- ۲۳

۲-۱۴-۵- شرایط---------- ۲۴
۲-۱۴-۶- شیوه و روش---------- ۲۴
۲-۱۵- آزمون استاندارد برای تعیین خصوصیت‌های خمشی ساختارهای ساندویچی---------- ۲۴
۲-۱۵-۱- حوزه و دامنه---------- ۲۴
۲-۱۵-۲- اهمیت و استفاده---------- ۲۵
۲-۱۵-۳- دستگاه آزمون---------- ۲۵
۲-۱۵-۴- نمونه آزمون---------- ۲۵
۲-۱۵-۵- شرایط---------- ۲۵
۲-۱۵-۶- شیوه و روش---------- ۲۵
۲-۱۶- آزمون ضربه ASTM E۲۳-۸۸---------- ۲۶
۲-۱۶-۱- اصول---------- ۲۶
۲-۱۷- آزمون شارپی---------- ۲۶
۲-۱۷-۱- شکل و ابعاد نمونه در روش شارپی---------- ۲۷
۲-۱۸- آزمون آیزود---------- ۲۸
۲-۱۸-۱- شکل و ابعاد نمونه در آزمون آیزود---------- ۲۸
۲-۱۹- تقسیم بندی ضربه‌های وارد بر سازه‌های مرکب---------- ۲۹
۲-۲۰- اثر پارامترهای جرم و هندسه ضربه‌زن بر آسیب ناشی از ضربه---------- ۲۹
۲-۲۱- ضربه بر روی سازه‌های ساندویچی---------- ۳۰
۲-۲۲- سازه‌های ساندویچی ارتقا یافته---------- ۳۰
۲-۲۳- آزمون‌های ضربه---------- ۳۱
۲-۲۴- پارامترهای موثر بر تخریب ضربه‌ای---------- ۳۳
۲-۲۴-۱- خواص مواد---------- ۳۳

۲-۲۴-۲- سفتی جسم ضربه‌زننده---------- ۳۴
۲-۲۴-۳- پیش بارگذاری---------- ۳۵
۲-۲۴-۴- شرایط محیطی---------- ۳۶
فصل سوم: بررسی و مطالعه روش تجربی و عددی---------- ۳۷
۳-۱- روش ساخت پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم---------- ۳۸
۳-۲- آزمون کشش بر روی ورق‌های گالوانیزه و استیل---------- ۴۱
۳-۳- آزمون فشار بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پر شده با فوم -------- ۴۲
۳-۴- شبیه سازی آزمون فشار----------۴۴
۳-۴-۱- مدل‌سازی جنس ورق----------۴۴
۳-۴-۲- المان‌بندی ورق----------۴۵
۳-۴-۳- مدل‌سازی فوم---------- ۴۶
۳-۴-۴- المان‌بندی فوم----------۴۶
۳-۵- آزمون خمش سه نقطه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم-۴۷
۳-۶- شبیه سازی آزمون خمش سه نقطه---------- ۴۸
۳-۶-۱- مدل‌سازی---------- ۴۸
۳-۶-۲- المان‌بندی---------- ۴۸
۳-۷- آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم---------- ۴۹
۳-۸- شبیه‌سازی آزمون ضربه----------۵۱
۳-۸-۱- مدل‌سازی----------۵۱
۳-۸-۲- المان‌بندی----------۵۲
فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها----------۵۳
۴-۱- تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم پس از آزمون فشار-۵۴

۴-۲- تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته‌کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه----------۵۶

۴-۳- تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون‌فوم و پرشده با فوم پس از آزمون ضربه--۵۹

۴-۴- بررسی اعتبار مدل‌سازی عددی----------۶۱

۴-۴-۱- بررسی اعتبار مدل‌سازی عددی آزمون فشار----------۶۱

۴-۴-۲- بررسی اعتبار مدل‌سازی عددی آزمون خمش سه نقطه----------۶۲

۴-۴-۳- بررسی اعتبار مدل‌سازی عددی آزمون ضربه----------۶۳

۴-۵- تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون فشار به روش عددی----------۶۴

۴-۶- تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۶۷

۴-۷- تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون ضربه به روش عددی----------۷۰

۴-۸- مقایسه نتایج بدست آمده در آزمون فشار به روش تجربی و عددی----------۷۲

۴-۹- مقایسه نتایج بدست آمده در آزمون خمش سه نقطه به روش تجربی و عددی----------۷۶

۴-۱۰- مقایسه نتایج بدست آمده در آزمون ضربه به روش تجربی و عددی---------- ۸۷

۴-۱۱- مقایسه ظرفیت جذب انرژی در آزمون فشار به روش تجربی و عددی---------- ۹۹

۴-۱۲- مقایسه ظرفیت جذب انرژی در آزمون خمش سه نقطه به روش تجربی و عددی------- ۱۰۲

۴-۱۳- مقایسه ظرفیت جذب انرژی در آزمون ضربه به روش تجربی و عددی---------- ۱۰۴

۴-۱۴- تعیین مکان تنش‌های برشی در آزمون‌های فشار، خمش سه نقطه و ضربه----------۱۰۵

۴-۱۴-۱- آزمون فشار بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم----------۱۰۵

۴-۱۴-۲-آزمون خمش سه نقطه بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم---------- ۱۰۶

۴-۱۴-۳- آزمون ضربه بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم---------- ۱۰۸

۴-۱۵- نتایج ---------- ۱۰۹

۴-۱۶- پیشنهادها---------- ۱۱۰

مراجع---------- ۱۱۲

پیوست الف: آزمون استاندارد برای تعیین خصوصیت‌های فشاری هسته ساندویچی---------- ۱۱۷

پیوست ب: آزمون استاندارد برای تعیین خصوصیت‌های خمشی ساختارهای ساندویچی-------۱۲۰

پیوست ج: طریقه بدست آوردن سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان به کمک نرم‌افزار متلب------ ۱۲۳

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول ۲-۱: مقایسه ماتریس‌های ترموست و ترموپلاستیک----------۹

جدول ۲-۲: تاثیر ضخامت هسته‌های منشوری در پانل‌های ساندویچی----------۱۸

جدول ۲-۳: مقاله‌های مرتبط با آزمون ضربه ----------۳۲

جدول ۳-۱: خواص مکانیکی ورق استیل----------۴۴

جدول ۳-۲: خواص مکانیکی ورق گالوانیزه----------۴۴

جدول ۳-۳: سایز مش----------۴۵

جدول ۳-۴: خواص مکانیکی فوم پلی‌اورتان----------۴۶

جدول ۳-۵: شرایط کارسختی فوم پلی‌اورتان----------۴۶

جدول ۴-۱: عمق فرورفتگی در آزمون ضربه سقوطی به روش تجربی----------۶۰

جدول ۴-۲: مقایسه عمق فرورفتگی در آزمون ضربه به روش تجربی و عددی----------۶۴

فهرست اشکال

عنوان صفحه

شکل ۲-۱: اهمیت نسبی توسعه مواد در طول تاریخ ----------۷

شکل ۲-۲: شکل‌های مختلف مواد مرکب----------۸

شکل ۲-۳: کاربرد فوم در پوسته و تقویت کننده‌های بال و لانه‌زنبوری در بدنه هواپیما---------- ۱۰

شکل ۲-۴: عملکرد صفحه‌های ساندویچی ----------۱۰

شکل ۲-۵: مقایسه مقاومت‌های فشاری و برشی انواع مغزی‌ها ----------۱۰

شکل ۲-۶ : مقایسه قیمت مغزی‌ها ----------۱۱

شکل ۲-۷: اجزای کامپوزیتی کابین و بدنه قطار----------۱۴

شکل ۲-۸: رشد مصرف مواد مرکب در هواپیماهای جنگی ----------۱۵

شکل ۲-۹: درصد مواد مرکب مورد استفاده در هواپیماهای بوئینگ و ایرباس ----------۱۵

شکل ۲-۱۰: پانل ساندویچی مونتاژ نشده ----------۱۶

شکل ۲-۱۱: دیواره‌های کناری در کانتینر کامیون----------۱۷

شکل ۲-۱۲: تونل‌های خشک کننده چوب----------۱۷

شکل ۲-۱۳: پانل ساندویچی با هسته فوم ----------۱۸

شکل ۲-۱۴: چوب بالسا----------۱۸

شکل ۲-۱۵: هسته‌های منشوری----------۱۹

شکل ۲-۱۶: هسته‌های شبکه‌ای----------۱۹

شکل ۲-۱۷: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای----------۲۰

شکل ۲-۱۸: شمایی از نمونه استاندارد آزمون فشار ----------۲۱

شکل ۲-۱۹: نمودار نیرو-کاهش ارتفاع----------۲۲

شکل ۲-۲۰: دستگاه آزمون----------۲۳

شکل ۲-۲۱: نحوه در نظر گرفتن اندازه و ارتفاع سلول هسته‌های سلول باز----------۲۳
شکل ۲-۲۲: بارگذاری تک نقطه‌ای----------۲۵
شکل ۲-۲۳: بارگذاری دو نقطه‌ای ----------۲۶
شکل ۲-۲۴: نحوه قرارگرفتن نمونه در آزمون شارپی ----------۲۷
شکل ۲-۲۵: شمایی از شیار موجود بر روی نمونه‌های آزمون شارپی ----------۲۷
شکل ۲-۲۶: نحوه قرارگرفتن نمونه در آزمون آیزود ----------۲۸
شکل ۲-۲۷: شمایی از نمونه آزمون آیزود ----------۲۹
شکل۲-۲۸: هندسه ضربه‌زن‌ها ----------۳۰
شکل ۲-۲۹: دستگاه وزنه سقوطی ----------۳۲
شکل ۲-۳۰: آزمونگر پاندولی ----------۳۳
شکل۲-۳۱: الف) ناحیه تخریب بر حسب سرعت ضربه، ب) ناحیه تخریب بر حسب انرژی ضربه--۳۵
شکل ۳-۱: ورق کرکره‌ای هسته----------۳۸
شکل ۳-۲: نحوه مونتاژ نمودن پانل ساندویچی----------۳۹
شکل ۳-۳: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم ----------۴۰
شکل ۳-۴: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۴۰
شکل ۳-۵: نمونه مورد استفاده در آزمون کشش ASTM E8 ----------۴۱
شکل ۳-۶: نمودار تنش-کرنش گالوانیزه----------۴۱
شکل۳-۷: نمودار تنش-کرنش استیل----------۴۲
شکل ۳-۸: آزمون فشار بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای ----------۴۲
شکل ۳-۹: آزمون فشار بر روی پانل ساندویچی ----------۴۳
شکل ۳-۱۰: مجموعه پانل ساندویچی و صفحه صلب در زیر دستگاه آزمون فشار----------۴۳
شکل ۳-۱۱: مدل‌سازی هسته ----------۴۴

شکل ۳-۱۲: مدل‌سازی ورق بالا و پایین----------۴۵
شکل ۳-۱۳: مدل‌سازی مونتاژ قطعه‌های ایجاد شده----------۴۵
شکل ۳-۱۴: مدل مش‌بندی شده----------۴۵
شکل ۳-۱۵: قرار گرفتن فوم در فضاهای خالی هسته ----------۴۶
شکل ۳-۱۶: المان‌بندی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۴۷
شکل ۳-۱۷: دستگاه آزمون خمش سه نقطه (برای اعمال بارهای بسیار زیاد)----------۴۷
شکل ۳-۱۸: دستگاه خمش سه نقطه (برای اعمال بارهای سبک‌تر)----------۴۸
شکل ۳-۱۹: مدل‌سازی مونتاژ اجزای ایجاد شده در آزمون خمش سه نقطه----------۴۸
شکل ۳-۲۰: مدل مش‌بندی شده----------۴۹
شکل ۳-۲۱: مدل‌سازی آزمون خمش سه نقطه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۴۹
شکل ۳-۲۲: دستگاه آزمون ضربه سقوطی----------۵۰
شکل ۳-۲۳: سنبه فولادی----------۵۰
شکل ۳-۲۴: محل قرارگیری نمونه در آزمون ضربه سقوطی----------۵۱
شکل ۳-۲۵ : مدل قسمت ضربه‌زننده----------۵۱
شکل ۳-۲۶: مدل‌سازی مونتاژ اجزا ایجاد شده----------۵۱
شکل ۳-۲۷: مدل مش‌بندی شده----------۵۲
شکل۳-۲۸: مدل‌سازی مونتاژ پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم----------۵۲
شکل۳-۲۹: مدل مش‌بندی شده پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم----------۵۲
شکل ۴-۱: پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون فشار----------۵۴
شکل ۴-۲: پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم پس از آزمون فشار----------۵۵
شکل ۴-۳: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای بدون فوم در روش تجربی------۵۵

شکل ۴-۴: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم روش تجربی-------۵۶

شکل ۴-۵: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون خمش سه نقطه----------۵۷

شکل ۴-۶: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه------۵۷

شکل۴-۷: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای بدون فوم در روش تجربی--------۵۸

شکل۴-۸: نمودارنیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم در روش تجربی------۵۹

شکل ۴-۹: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون ضربه سقوطی----------۵۹

شکل ۴-۱۰: پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون ضربه سقوطی-------۶۰

شکل ۴-۱۱: نمودار مقایسه عددی و تجربی نیرو-تغییرمکان پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون فشار----------۶۲

شکل۴-۱۲: نمودار مقایسه عددی و تجربی نیرو-تغییرمکان پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون خمش سه نقطه----------۶۳

شکل۴-۱۳: تغییرشکل نهایی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم در آزمون فشار به روش عددی----------۶۴

شکل۴-۱۴: تغییرشکل نهایی پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۵

شکل ۴-۱۵-الف: نمودار نیرو-تغییرمکان پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۵

شکل ۴-۱۵-ب: تغییر شکل الاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۶

شکل ۴-۱۵-ج: آغاز تغییرشکل پلاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۶

شکل ۴-۱۶-الف: نمودار نیرو-تغییرمکان پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۶

شکل ۴-۱۶-ب: تغییرشکل الاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۷

شکل ۴-۱۶-ج: آغاز تغییر شکل پلاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم پس از آزمون فشار به روش عددی----------۶۷

شکل ۴-۱۷: تغییرشکل نهایی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم در آزمون‌خمش سه نقطه به روش عددی----------۶۷

شکل ۴-۱۸: تغییر شکل نهایی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۶۸

شکل۴-۱۹-الف: نمودار نیرو-تغییرمکان پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۶۸

شکل ۴-۱۹-ب: تغییرشکل الاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۶۹

شکل۴-۲۰-الف: نمودار نیرو-تغییرمکان پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۶۹

شکل ۴-۲۰-ب: تغییرشکل الاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۷۰

شکل ۴-۲۰-ج: آغاز تغییرشکل پلاستیک پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۷۰

شکل ۴-۲۱: پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون ضربه به روش عددی-----۷۰

شکل۴-۲۲: پانل‌ساندویچی با هسته پرشده با فوم پس از آزمون ضربه به روش عددی----------۷۱

شکل۴-۲۳: نمودار نیرو-تغییرمکان پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون ضربه سقوطی به روش عددی----------۷۱

شکل۴-۲۴: نمودار نیرو-تغییرمکان پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از آزمون ضربه سقوطی به روش عددی----------۷۲

شکل۴-۲۵: مقایسه تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون فشار به روش تجربی و عددی----------۷۳

شکل۴-۲۶: تغییر اندازه مش در مدل‌سازی عددی آزمون فشار بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۷۵

شکل۴-۲۷: تغییر اندازه مش در مدل‌سازی عددی آزمون فشار بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۷۶

شکل ۴-۲۸: مقایسه تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون خمش سه نقطه به روش تجربی و عددی----------۷۷

شکل۴-۲۹: تغییر اندازه مش در مدل‌سازی عددی آزمون خمش سه نقطه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۷۹

شکل۴-۳۰: تغییر اندازه مش در مدل‌سازی عددی آزمون خمش سه نقطه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۸۰

شکل۴-۳۱: تغییر قطر ابزار در مدل‌سازی عددی آزمون خمش سه نقطه پانل ساندویچی با هسته‌کرکره‌ای بدون فوم----------۸۲

شکل۴-۳۲: تغییر قطر ابزار در مدل‌سازی عددی آزمون خمش سه نقطه پانل ساندویچی با هسته‌کرکره‌ای پرشده با فوم----------۸۳

شکل۴-۳۳: قرارگیری ابزار بر روی محل اتصال هسته به ورق بالا در پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۸۳

شکل۴-۳۴: تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۸۴

شکل۴-۳۵: تغییر جایگاه ابزار بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم در آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۸۴

شکل۴-۳۶: تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم پس از اعمال بار خمشی-----۸۵

شکل۴-۳۷: قرارگیری ابزار بر روی محل اتصال هسته به ورق بالا در پانل ساندویچی با هسته پرشده با فوم----------۸۵

شکل۴-۳۸: تغییر شکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم پس از آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۸۶

شکل۴-۳۹: تغییر جایگاه ابزار بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم در آزمون خمش سه نقطه به روش عددی----------۸۶

شکل۴-۴۰: تغییرشکل پانل‌ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم پس از اعمال بار خمشی---۸۷

شکل۴-۴۱: مقایسه تغییرشکل پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم و پرشده با فوم در آزمون ضربه به روش تجربی و عددی----------۸۸

شکل۴-۴۲: تغییر اندازه مش در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۸۹

شکل۴-۴۳: تغییر اندازه مش در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۹۱

شکل۴-۴۴: تغییر جای ابزار در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۹۲

شکل۴-۴۵: تغییر جای ابزار در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۹۳

شکل۴-۴۶: استفاده از ابزار سرتیز در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۹۵

شکل۴-۴۷: استفاده از ابزار سرتیز در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۹۶

شکل۴-۴۸: استفاده از ابزار سرتخت در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای بدون فوم----------۹۷

شکل۴-۴۹: استفاده از ابزار سرتخت در مدل‌سازی عددی آزمون ضربه بر روی پانل ساندویچی با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم----------۹۸

شکل ۴-۵۰: مقایسه ظرفیت جذب انرژی در آزمون فشار با توجه به نتایج تجربی و عددی------۱۰۰

شکل ۴-۵۱: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای بدون فوم در روش تجربی-----۱۰۰

شکل۴-۵۲: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای پرشده با فوم در روش تجربی--۱۰۱

شکل۴-۵۳: مقایسه ظرفیت جذب انرژی در آزمون خمش سه نقطه با توجه به نتایج تجربی و عددی----------۱۰۲

شکل۴-۵۴: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای بدون فوم در روش تجربی-----۱۰۳

شکل۴-۵۵: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های با هسته کرکره‌ای پر شده با فوم درروش تجربی--۱۰۳