



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی با هسته FGM تحت ضربه

عرضی چند جرم ضربه زننده

اساتید راهنما:

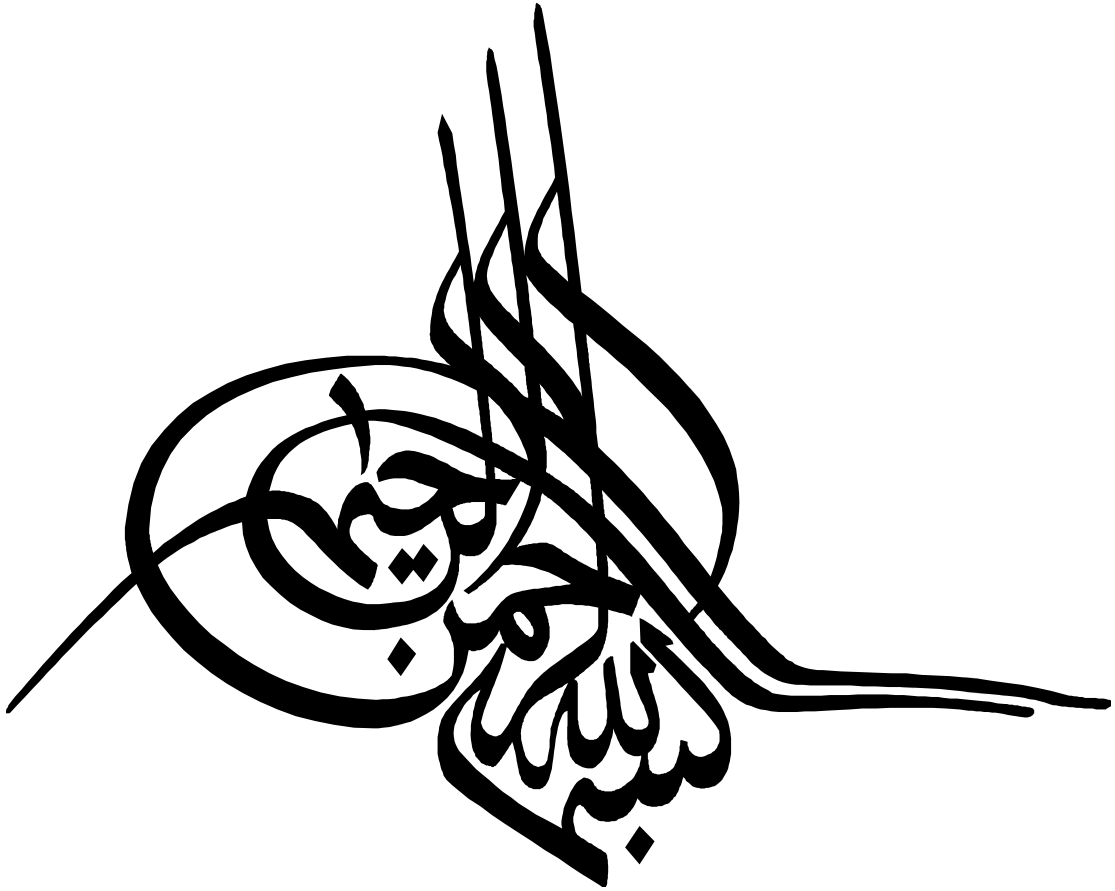
پروفسور سید محمد رضا خلیلی

دکتر کرامت ملک زاده

نگارنده:

امیر ویسی گرگ آباد

بهمن ۱۳۹۰



چکیده

در این پایان‌نامه در ابتدا به مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه پایان‌نامه حاضر و بررسی اهداف کار پرداخته خواهد شد و در ادامه انگیزه پژوهش، فرضیات انجام شده برای حل مسئله و نوآوری‌هایی که در این پژوهش انجام شده است، بررسی خواهد شد. سپس با استفاده از تئوری مرتبه بالای پنل‌های ساندویچی (IHSAPT)، آنالیز ارتعاشات آزاد و همچنین پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی با هسته‌های مختلف (فوم یا انواع هسته‌های هدفمند) تحت ضربه عرضی چند جرم ضربه زننده در نقاط و رویه‌های مختلف بررسی می‌شود. در فرمولبندی ارائه شده برای رویه‌ها از تئوری مرتبه اول برشی و برای میدان جابجایی هسته از یک چند جمله‌ای که بر اساس مدل دوم فراستیگ^۱ می‌باشد، استفاده می‌شود. ضرایب چند جمله‌ای و همچنین مولفه‌های جابجایی رویه‌ها مجهولات مسئله می‌باشند. همچنین فرض می‌شود که ضربه زننده‌ها به طور عمودی و بر هر کدام از رویه‌های بالا و یا پایین وارد می‌شوند. نیروی حاصل از ضربه زننده‌ها به صورت نیروهای داخلی سیستم در نظر گرفته می‌شوند و در این پایان‌نامه به منظور مدل سازی پدیده ضربه برای اولین بار دو مدل ارائه می‌شود: اول، مدل جرم و فنر دو درجه آزادی خطی شده که با استفاده از یک روش جدید خطی می‌شود. دوم، مدل هرتز^۲ بهبود یافته که از شکل کلی قانون تماس هرتز استفاده می‌کند. به منظور صحت‌گذاری روابط ارائه شده در تحلیل‌های ارتعاشات و ضربه چند مثال ارائه شده و نتایج به دست آمده از مدل‌های ارائه شده با هم و با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های تحلیلی و تجربی انجام شده قبلی مقایسه گردیده است. همچنین به منظور صحت‌گذاری بیشتر روابط، نتایج به دست آمده از مدل‌های تحلیلی ارائه شده با نتایج به دست آمده از تحلیل عددی در نرم افزار ABAQUS نیز مقایسه گردیده است. توافق نسبتاً خوبی بین نتایج برقرار است. چون هیچ پژوهشی در تحلیل چند ضربه‌ی تیرهای ساندویچی انجام نشده است، بنابراین به منظور صحت‌گذاری نتایج در این حالت، دو مسئله ضربه (تک ضربه و دو ضربه) ارائه می‌شود و روابط در این حالت نیز صحت‌گذاری می‌گردد. توافق بسیار خوبی در این حالت نیز حاصل گردیده است. در ادامه اثر پارامترهای هندسی و مکانیکی شامل نسبت طول به ضخامت تیر، نسبت ضخامت هسته به ضخامت تیر، نوع ماده هدفمند هسته، توان ماده هدفمند، ضخامت رویه‌ها، جنس رویه‌ها، شعاع، سرعت برخورد و جرم ضربه زننده‌ها، موقعیت نقاط برخورد، فاصله ضربه زننده‌ها از هم و نوع رویه برخورد بر رفتار دینامیکی تیر ساندویچی مورد مطالعه قرار گرفته است.

^۱ Frostig

^۲ Hertz

فهرست مطالب

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| ۱ | فصل اول: مروری بر پنل‌های ساندویچی و FGM ها |
| ۲ | (۱-۱) مقدمه |
| ۳ | (۲-۱) اهمیت موضوع |
| ۴ | (۳-۱) سازه‌های ساندویچی |
| ۵ | (۴-۱) کاربرد و مزایای سازه‌های ساندویچی |
| ۷ | (۵-۱) شناسایی FGM ها |
| ۸ | (۱-۵-۱) تعاریف FGM |
| ۸ | (۲-۵-۱) تاریخچه مواد هدفمند |
| ۱۰ | (۳-۵-۱) علت انتخاب مواد هدفمند در هسته سازه‌های ساندویچی |
| ۱۰ | (۴-۵-۱) مدل‌های ریاضی بیان کننده خواص مکانیکی مواد هدفمند |
| فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده در سازه‌های کامپوزیتی، ساندویچی و هدفمند | |
| ۱۷ | (ضربه و ارتعاشات) |
| ۱۷ | (۱-۲) مقدمه |
| ۱۷ | (۲-۲) پیشینه‌ی تحقیق در سازه‌های کامپوزیتی و ساندویچی |
| ۱۹ | (۳-۲) برخورد در سازه‌های کامپوزیتی و ساندویچی |
| ۳۰ | (۴-۲) تحقیقات انجام شده در زمینه ضربه و ارتعاشات در سازه‌های هدفمند |
| ۳۴ | (۵-۲) نتیجه‌گیری |
| فصل سوم: معادلات تئوری مرتبه بالای بهبود یافته حاکم بر تیر ساندویچی با هسته FGM | |
| ۳۶ | تحت چند جرم ضربه زننده |
| ۳۷ | (۱-۳) مقدمه |
| ۳۷ | (۲-۳) مدل سازی مسئله و فرضیات |
| ۴۰ | (۳-۳) استخراج معادلات حاکم بر تیر |
| ۴۵ | (۴-۳) پاسخ دینامیکی ارتعاشات آزاد برای تیر با تکیه‌گاه ساده |

- ۴۶..... (۵-۳) ضربه بر روی تیر ساندویچی
- ۴۷..... (۱-۵-۳) ارائه مدل جدید جرم و فنر خطی شده در شبیه سازی مسائل تک و چند ضربه زننده
- ۵۳..... (۲-۵-۳) استفاده از مدل کامل برای مدل سازی ضربه
- ۵۶..... **فصل چهارم: نتایج حاصل از آنالیز ارتعاشات آزاد تیر ساندویچی**
- ۵۷..... (۱-۴) مقدمه
- ۵۷..... (۲-۴) صحه گذاری
- ۵۷..... (۱-۲-۴) آنالیز ارتعاشاتی یک تیر با هسته فوم و رویه همگن
- ۵۹..... (۲-۲-۴) آنالیز ارتعاشاتی یک تیر هدفمند
- ۶۰..... (۳-۴) مثال‌های حل شده
- ۶۰..... (۱-۳-۴) مثال اول: آنالیز ارتعاشاتی یک تیر با هسته هدفمند و رویه‌های نامتقارن
- ۶۲..... (۲-۳-۴) مثال دوم: بررسی ارتعاشاتی تیر ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و انواع هسته‌های FGM
- ۶۸..... (۱-۲-۳-۴) بررسی اثر توابع مختلف هدفمند هسته بر روی میدان جابجایی هسته
- ۶۹..... (۲-۲-۳-۴) بررسی اثر توان تابع هدفمند هسته بر روی میدان جابجایی هسته
- ۷۱..... (۳-۲-۳-۴) بررسی تأثیر تغییرات نوع تابع هدفمند هسته بر تنش‌های $\sigma_{xzc}, \sigma_{zxc}$
- ۷۳..... (۴-۲-۳-۴) بررسی تأثیر تغییرات توان تابع هدفمند هسته بر تنش نرمال σ_{xzc} هسته
- ۷۴..... (۴-۴) نتیجه‌گیری کلی
- فصل پنجم: نتایج حاصل از آنالیز دینامیکی تیر ساندویچی تحت ضربه عرضی تک جرم**
- ۷۵..... **ضربه زننده با سرعت پایین**
- ۷۶..... (۱-۵) مقدمه
- ۷۶..... (۲-۵) مثال اول: تحلیل دینامیکی یک تیر ساندویچی با هسته ایزوتروپیک تحت ضربه یک جرم
- ۷۶..... ضربه زننده در وسط تیر
- ۷۷..... (۱-۲-۵) مدل سازی و تحلیل تیر ساندویچی مفروض تحت ضربه عرضی سرعت پایین در نرم افزار ABAQUS
- ۷۸..... (۳-۵) مثال دوم: تحلیل دینامیکی یک تیر ساندویچی با هسته غیر FGM و رویه‌های کامپوزیتی
- ۸۴..... تحت ضربه عرضی یک جرم ضربه زننده در وسط تیر

- ۴-۵) مثال سوم: تحلیل دینامیکی یک تیر ساندویچی با هسته FGM و رویه‌های کامپوزیتی تحت ضربه عرضی یک جرم ضربه زننده در وسط تیر..... ۸۶
- ۴-۵-۱) ضربه با سرعت پایین در وسط تیر ساندویچی ($x/a=0.5$)..... ۸۷
- ۴-۵-۱-۱) اثر سرعت برخورد ضربه زننده بر رفتار دینامیکی..... ۸۹
- ۴-۵-۲) ضربه با سرعت پایین در نقطه‌ی غیر از وسط تیر ساندویچی ($x=a/5$)..... ۹۱
- ۴-۵-۲-۱) اثر توان ماده هدفمند بعنوان هسته..... ۹۳
- ۴-۵-۲-۲) اثر نسبت طول به ضخامت تیر ساندویچی (a/h)..... ۹۷
- ۵-۵) نتیجه گیری..... ۱۰۰
- فصل ششم: نتایج حاصل از آنالیز دینامیکی تیر ساندویچی تحت ضربه عرضی چند جرم**
- ضربه زننده با سرعت پایین..... ۱۰۱
- ۱-۶) مقدمه..... ۱۰۲
- ۲-۶) پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی تحت دو جرم ضربه زننده در حالت برخورد یک طرفه (ضربه زننده‌ها به یکی از رویه‌ها برخورد میکنند)..... ۱۰۳
- ۲-۶-۱) اثر شعاع ضربه زننده..... ۱۰۸
- ۲-۶-۲) اثر سرعت ضربه زننده..... ۱۱۱
- ۲-۶-۳) اثر نسبت ضخامت هسته به ضخامت تیر ساندویچی (hc/h)..... ۱۱۴
- ۳-۶) پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی تحت برخورد دو جرم ضربه زننده در حالت برخورد دو طرفه (ضربه زننده به رویه‌های مختلف برخورد میکنند)..... ۱۱۸
- ۳-۶-۱) اثر جرم ضربه زننده‌ها بر رفتار دینامیکی سیستم..... ۱۲۱
- ۳-۶-۲) اثر توان ماده هدفمند هسته (n) بر رفتار دینامیکی سیستم..... ۱۲۴
- ۳-۶-۳) اثر ضخامت رویه‌های بالا و پایین تیر ساندویچی بر رفتار دینامیکی سیستم..... ۱۲۷
- ۴-۶) پاسخ دینامیکی تیر تحت برخورد دو جرم ضربه زننده دو طرفه روبروی هم..... ۱۳۱
- ۴-۶-۱) اثر جنس رویه‌های بالا و پایین تیر ساندویچی بر رفتار دینامیکی سیستم..... ۱۳۴
- ۵-۶) پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی تحت برخورد سه جرم ضربه زننده در حالت برخورد کاملاً تصادفی (برخورد در هر دو حالت یک طرف و دو طرفه)..... ۱۳۷

- ۶-۶) نتیجه گیری ۱۴۱
- فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات ادامه پژوهش ۱۴۳
- پیوست‌ها: ۱۴۴
- پیوست الف: ۱۴۸
- پیوست ب: ۱۴۹
- پیوست ج: ۱۵۵
- لیست مقالات منتشر شده ۱۵۷
- مراجع و منابع: ۱۵۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: تقسیم بندی ضربه برحسب سرعت ضربه زننده [۳]..... ۳
- جدول ۱-۲: مواد هدفمند ساخته شده از دو ماده فلز و سرامیک..... ۸
- جدول ۱-۴: فرکانس های طبیعی تیر ساندویچی..... ۵۸
- جدول ۲-۴: فرکانس پایه بی بعد شده تیر هدفمند..... ۵۹
- جدول ۳-۴: فرکانس های طبیعی برای تیر ساندویچی با هسته های مختلف FGM..... ۶۱
- جدول ۴-۴: فرکانس های بی بعد شده تیر ساندویچی با هسته های FGM مختلف..... ۶۳
- جدول ۱-۵: خواص ضربه زننده و تیر ساندویچی [۶۰]..... ۷۷
- جدول ۲-۵: خواص ضربه زننده و تیر ساندویچی با رویه ی کامپوزیتی..... ۸۴
- جدول ۳-۵: مقایسه نتایج به دست آمده از هر سه مدل ارائه شده..... ۸۵
- جدول ۴-۵: خواص ضربه زننده و تیر ساندویچی با رویه ی کامپوزیتی و هسته هدفمند..... ۸۶
- جدول ۱-۶: خواص تیر ساندویچی با رویه ی کامپوزیتی و هسته هدفمند..... ۱۰۳
- جدول ۲-۶: خواص ضربه زننده ها..... ۱۰۳
- جدول ۳-۶: خواص مکانیکی و هندسه تیرهای مختلف..... ۱۳۴
- جدول ۴-۶: خواص ضربه زننده ها..... ۱۳۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: یک نمونه سازه ساندویچی باز شده [۱] ۲
- شکل ۲-۱: تغییرات پیوسته مواد بین سطوح [۹] ۹
- شکل ۳-۱: هندسه یک ورق FGM ۱۱
- شکل ۴-۱: تغییرات مدول یانگ در یک صفحه P-FGM ۱۲
- شکل ۵-۱: تغییرات مدول یانگ در یک ورق (S-FGM) ۱۳
- شکل ۶-۱: تغییرات مدول یانگ در ورق (E-FGM) ۱۴
- شکل ۱-۳: تیر ساندویچی تحت ضربه عرضی چند جرم ضربه زننده ۳۹
- شکل ۲-۳: مدل جرم و فنر دو درجه آزادی ۴۷
- شکل ۱-۴: چهار شکل مود مربوط به $m=1$ با هسته P-FGM ۶۱
- شکل ۲-۴: چهار شکل مود اول مربوط به $m=1$ برای تیر با هسته موری-تاناکا ۶۴
- شکل ۳-۴: اثر نسبت طول به ضخامت کل تیر برای هسته موری-تاناکا ۶۵
- شکل ۴-۴: اثر ضخامت هسته به ضخامت کل تیر برای هسته‌های مختلف ۶۶
- شکل ۵-۴: چهار شکل مود اول مربوط به $m=2$ برای تیر با هسته هدفمند و تابع موری-تاناکا ۶۸
- شکل ۶-۴: جابجایی هسته تیر ساندویچی برای توابع مختلف هدفمند ($n=3$) ۶۹
- شکل ۷-۴: اثر توان تابع هدفمند بر روی میدان جابجایی هسته ۷۰
- شکل ۸-۴: اثر توان تابع هدفمند بر روی تنش نرمال و برشی ۷۱
- شکل ۹-۴: اثر نوع هسته تیر ساندویچی بر تنش برشی هسته در وجوه مختلف ۷۲
- شکل ۱۰-۴: اثر توان تابع هدفمند بر روی تنش نرمال هسته ۷۳
- شکل ۱۱-۴: اثر توان تابع هدفمند بر روی تنش برشی در مرکز ضخامت هسته با تابع موری تاناکا ... ۷۳
- شکل ۱-۵: مدل سازی اجزای تیر ساندویچی و ضربه زننده در نرم افزار ABAQUS ۷۸
- شکل ۲-۵: تیر ساندویچی و ضربه زننده در حالت مونتاژ شده ۷۹
- شکل ۳-۵: شرایط مرزی و سرعت اولیه اعمال شده بر مجموعه تیر و ضربه زننده ۸۰
- شکل ۴-۵: مش بندی اجزای تیر ساندویچی و ضربه زننده ۸۱
- شکل ۵-۵: تاریخچه نیروی تماس پیش بینی شده از آنالیز المان محدود و تحلیلی ۸۲
- شکل ۶-۵: پیش بینی تاریخچه خیز رویه بالایی از آنالیز المان محدود و تحلیلی ۸۳
- شکل ۷-۵: پیش بینی تاریخچه نیروی ضربه از مدل‌های مختلف پیشنهادی ۸۵

- شکل ۵-۸: پیش بینی تاریخچه نیروی ضربه از دو مدل ارائه شده برای تیر با هسته هدفمند..... ۸۷
- شکل ۵-۹: ماکزیمم خیز به وجود آمده در طول تیر برای ضربه در وسط تیر..... ۸۸
- شکل ۵-۱۰: ماکزیمم فرورفتگی بوجود آمده در هسته هدفمند..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱: تغییرات تاریخچه نیروی ضربه با سرعت برخورد..... ۸۹
- شکل ۵-۱۲: تغییرات خیز ماکزیمم در رویه‌ها در طول با سرعت برخورد..... ۹۰
- شکل ۵-۱۳: تغییرات جابجایی قائم در هسته هدفمند با سرعت ضربه زننده..... ۹۱
- شکل ۵-۱۴: تاریخچه نیروی ضربه برای حالت برخورد در نقطه‌ی $(x=a/5)$ ۹۲
- شکل ۵-۱۵: تغییرات ماکزیمم خیز رویه بالا و پایین در طول تیر با استفاده از دو مدل ارائه شده برای ضربه در نقطه‌ی $(x=a/5)$ ۹۲
- شکل ۵-۱۶: تغییرات فرورفتگی ماکزیمم در طول تیر..... ۹۳
- شکل ۵-۱۷: تغییرات جرم هسته با توان ماده هدفمند بعنوان هسته..... ۹۴
- شکل ۵-۱۸: تغییرات ماکزیمم نیروی برخورد با توان ماده هدفمند بعنوان هسته تیر..... ۹۴
- شکل ۵-۱۹: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین با توان ماده هدفمند هسته..... ۹۵
- شکل ۵-۲۰: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین و فرورفتگی در هسته هدفمند با توان ماده هدفمند..... ۹۶
- شکل ۵-۲۱: تغییرات تاریخچه نیروی برخورد با نسبت طول به ضخامت تیر..... ۹۷
- شکل ۵-۲۲: تغییرات بیشینه نیروی برخورد با نسبت a/h ۹۷
- شکل ۵-۲۳: تغییرات خیز ماکزیمم رویه‌های بالا و پایین با نسبت طول به ضخامت تیر..... ۹۹
- شکل ۵-۲۴: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی در هسته‌ی هدفمند تیر با نسبت طول به ضخامت (a/h) ۹۹
- شکل ۶-۱: تاریخچه نیروی برخورد برای دو مورد در نقاط برخورد مشترک $(x_1=a/6)$ ۱۰۴
- شکل ۶-۲: تغییرات خیز ماکزیمم رویه‌های بالا و پایین در راستای طول تیر برای دو حالت تک ضربه و دو ضربه..... ۱۰۵
- شکل ۶-۳: ماکزیمم فرورفتگی به وجود آمده در هسته هدفمند برای دو حالت تک ضربه و دو ضربه..... ۱۰۶
- شکل ۶-۴: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین با زمان تماس برای تیر تحت ضربه دو جرم ضربه زننده..... ۱۰۷
- شکل ۶-۵: تغییرات تاریخچه نیروی برخورد با شعاع ضربه زننده در نقطه $(x_1=a/5)$ ۱۰۸

- شکل ۶-۶: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر با شعاع ضربه زنده‌ها
 ۱۰۹
- شکل ۶-۷: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی در هسته هدفمند با شعاع ضربه زنده ۱۱۰
- شکل ۶-۸: تغییرات مولفه‌ی قائم خیز به وجود آمده در هسته هدفمند در راستای ضخامت هسته با
 شعاع ضربه زنده ۱۱۱
- شکل ۶-۹: تغییرات تاریخچه نیروی برخورد با سرعت ضربه زنده‌ها در نقطه‌ی $(x_1=a/4)$ ۱۱۲
- شکل ۶-۱۰: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر با سرعت‌های مختلف
 ضربه زنده ۱۱۲
- شکل ۶-۱۱: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی در هسته هدفمند در راستای طولی تیر با سرعت‌های مختلف
 ضربه زنده ۱۱۳
- شکل ۶-۱۲: تغییرات تاریخچه نیروی برخورد با نسبت hc/h در هر دو نقطه‌ی برخورد ۱۱۵
- شکل ۶-۱۳: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر با نسبت hc/h ۱۱۵
- شکل ۶-۱۴: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی با نسبت ضخامت هسته به ضخامت تیر ۱۱۶
- شکل ۶-۱۵: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی هسته با نسبت a/h ۱۱۷
- شکل ۶-۱۶: تغییرات نیروی بیشینه برخورد با موقعیت‌های مختلف برخورد بر رویه‌های بالا و پایین
 ۱۱۸
- شکل ۶-۱۷: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر برای برخورد غیر هم
 جهت ۱۱۹
- شکل ۶-۱۸: تغییرات فرورفتگی ماکزیمم هسته در راستای طولی تیر برای برخورد غیر هم جهت .. ۱۲۰
- شکل ۶-۱۹: تغییرات تاریخچه نیروی برخورد با جرم ضربه زنده‌ها ۱۲۱
- شکل ۶-۲۰: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر با اجرام ضربه زنده در
 حالت برخورد غیر هم جهت ۱۲۲
- شکل ۶-۲۱: تغییرات فرورفتگی ماکزیمم در هسته‌ی هدفند با جرم ضربه زنده‌ها ۱۲۳
- شکل ۶-۲۲: تغییرات مولفه‌ی قائم جابجایی هسته در راستای ضخامت هسته برای ترکیب‌های مختلف
 اجرام ضربه زنده ۱۲۴
- شکل ۶-۲۳: تغییرات ماکزیمم نیروی برخورد در نقاط برخورد با توان ماده هدفمند هسته ۱۲۵
- شکل ۶-۲۴: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر با توان ماده هدفمند
 ۱۲۶

- شکل ۶-۲۵: تغییرات فرورفتگی هسته در طول تیر با توان ماده هدفمند ۱۲۷
- شکل ۶-۲۶: تغییرات ماکزیمم نیروی برخورد در نقاط ضربه خورنده با ضخامت رویه‌ها ۱۲۸
- شکل ۶-۲۷: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر با ضخامت‌های مختلف رویه‌ها ۱۲۹
- شکل ۶-۲۸: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی هسته با ضخامت‌های مختلف رویه‌ها ۱۳۰
- شکل ۶-۲۹: تیر تحت برخورد دو جرم ضربه زننده از رو به روی هم ۱۳۱
- شکل ۶-۳۰: تاریخچه نیروی برخورد دو جرم ضربه زننده در مقابل هم در نقطه‌ی برخورد $xt=a/4$ ۱۳۱
- شکل ۶-۳۱: ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر در حالت برخورد متقابل ۱۳۲
- شکل ۶-۳۲: ماکزیمم فرورفتگی در هسته در راستای طولی تیر در حالت برخورد متقابل ۱۳۳
- شکل ۶-۳۳: تغییرات نیروی برخورد برای تیرهای با مشخصات مختلف ۱۳۵
- شکل ۶-۳۴: تغییرات خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی برای تیرهای مختلف ۱۳۵
- شکل ۶-۳۵: تغییرات ماکزیمم فرورفتگی هسته در راستای طولی تیر برای تیرهای مختلف ۱۳۷
- شکل ۶-۳۶: تاریخچه نیروی برخورد برای سه ضربه زننده در نقاط برخورد با استفاده از هر دو مدل ارائه شده ۱۳۸
- شکل ۶-۳۷: تغییرات ماکزیمم خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طولی تیر برای تیر تحت ضربه سه ضربه زننده ۱۳۹
- شکل ۶-۳۸: تغییرات فرورفتگی ماکزیمم با ضخامت‌های مختلف رویه‌ها ۱۴۰

فهرست علائم و اختصارات

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| a, b | طول و عرض تیر ساندویچی |
| h_t, h_b, h_c, h | ضخامت رویه‌های بالایی، پایینی، هسته میانی و کل ورق ساندویچی |
| Z_t, Z_b, Z_c | مختصات قائم در رویه‌ها و هسته میانی |
| M_{tot} | جرم کل پنل |
| M_{eff}^P | جرم مؤثر پنل |
| T | انرژی جنبشی |
| U | انرژی پتانسیل داخلی |
| VK | انرژی خارجی |
| K | مدول حجمی |
| G | مدول برشی |
| K_1, G_1 | مدول حجمی و برشی فاز زمینه |
| K_2, G_2 | مدول حجمی و برشی فاز تقویت کننده |
| k, α | ضرایب انتقال و انبساط گرمایی |
| u_c, w_c | مولفه‌های تغییر مکان در هسته میانی |
| u_{0t}, w_{0t} | مولفه‌های تغییر مکان در رویه بالایی |
| u_{0b}, w_{0b} | مولفه‌های تغییر مکان در رویه پایینی |
| \ddot{u}_c, \ddot{w}_c | مولفه‌های شتاب در هسته میانی |
| \ddot{u}_t, \ddot{w}_t | مولفه‌های شتاب در رویه بالایی |
| \ddot{u}_b, \ddot{w}_b | مولفه‌های شتاب در رویه پایینی |
| ρ_t, ρ_b, ρ_c | چگالی رویه‌ها و هسته میانی |
| N_{xx} | نیروی صفحه‌ای بر واحد طول لبه |
| Q_{xz}, Q_{yz} | نیروهای برشی در واحد طول |
| M_{xx}, M_{yy}, M_{xy} | ممان‌های برشی و خمشی در واحد طول لبه |
| $t_2 - t_1$ | بازه زمانی |
| t, b, c | معرف رویه‌های بالا، پایین و هسته |
| V_t, V_b, V_c | حجم رویه‌های بالا، پایین و هسته میانی |
| A_{ij}, B_{ij}, D_{ij} | سفتی کششی، کوپلی و خمشی |
| σ_{zz}^c | تنش‌های نرمال در هسته میانی |
| $\sigma_{xx}^c, \sigma_{yy}^c$ | تنش‌های نرمال صفحه‌ای در هسته میانی |
| τ_{xz}^c, τ_{yz}^c | تنش‌های برشی در هسته میانی |
| τ_{xy}^c | تنش برشی صفحه‌ای در هسته میانی |

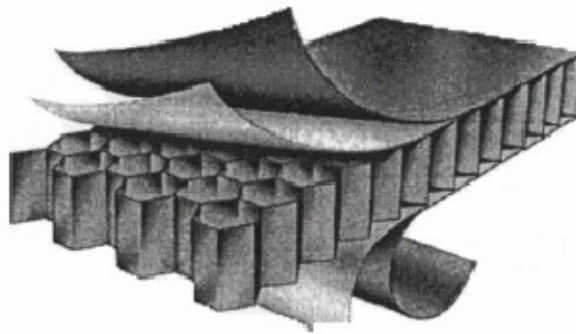
| | |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| E_{ij}^c, G_{ij}^c ($i, j = x, z$) | مدول‌های الاستیسیته و برشی هسته |
| δ | اوپراتور تغییرات |
| $x_{ij}^c, (x = \varepsilon, \gamma), (i, j = x, z)$ | کرنش‌های عرضی و برشی |
| ψ_x | چرخش‌های مقاطع عرضی |
| $A_{ij}^x, B_{ij}^x, D_{ij}^x (x = t, b)$ | روابط ساختاری بین نیروها و گشتاورها |
| C^{mn} | ضرایب سری فوریه |
| m, M | شمارنده |
| $[K]$ | ماتریس سفتی ورق ساندویچی |
| $[M]$ | ماتریس جرمی ورق |
| X_0 | بردار متغیرهای تغییر مکان |
| n | پارامتر توان در کسر حجمی توزیع خواص مواد هدفمند |
| M_l^i | جرم i امین ضربه زننده |
| R^i | شعاع i امین ضربه زننده |
| K_c^i | سفتی تماسی i امین ضربه زننده |
| $F^i(t)$ | نیروی تماسی برای i امین ضربه زننده |
| V_0^i | سرعت برخورد i امین ضربه زننده |
| V_k^i | ضریب پواسون i امین ضربه زننده |
| E_k^i | مدول الاستیسیته i امین ضربه زننده |
| δ^{m_i} | فرورفتگی متناظر با i امین ضربه زننده |
| K_c^{*i} | سفتی تماسی خطی شده i امین ضربه زننده |
| F_{cmax}^i | نیروی تماسی ماکزیمم برای i امین ضربه زننده |
| K_g^i | سفتی مربوط به تغییر شکل کلی سازه در i امین نقطه‌ی برخورد |
| Z_1^i, Z_2^i | توابع تغییر مکان عرضی در مدل‌های جرم- فنر برای i امین ضربه زننده |
| N^i | نسبت جرم ضربه زننده به جرم تیر |
| ω_1^i, ω_2^i | فرکانس‌های طبیعی سازه برای i امین ضربه زننده |
| ϕ_1^i, ϕ_2^i | شکل موده‌های سازه برای i امین ضربه زننده |
| t_{max}^i | زمان بیشینه متناظر با i امین ضربه زننده |
| x_i | نقطه‌ی برخورد متناظر با i امین ضربه زننده |
| w_p^i | جابجایی i امین ضربه زننده در i امین نقطه‌ی برخورد |
| i, j | شمارنده |

فصل اول:

مروری بر پنل‌های ساندویچی و FGM ها

۱-۱) مقدمه

سازه‌های ساندویچی به سازه‌هایی اطلاق می‌شوند که متشکل از دو رویه (skin) سفت و قوی و یک هسته (core) نرم و انعطاف پذیر باشد که این رویه‌ها به وسیله هسته از هم جدا می‌شوند (شکل ۱-۱) [۱]. رویه‌ها را معمولاً از ورق‌های فلزی یا ورق‌های کامپوزیتی می‌سازند و هسته این مواد می‌تواند از پلیمرهای سبک، فوم‌ها، سازه‌های لانه زنبوری یا مواد با خاصیت توزیع تابعی^۱ تشکیل شود. در سازه‌های ساندویچی رویه‌ها توانایی تحمل بارهای کششی و هسته نیز بارهای برشی را دارند. سازه‌های ساندویچی به دلیل دارا بودن وزن کم و استحکام بالا به نسبت وزنشان، عایق حرارتی بالا، شکل‌گیری آسان، ویژگی‌های عالی برشی، آسانی ساخت و تعمیر و آکوستیک (صوت) و... کاربرد بسیار زیادی پیدا کرده‌اند [۲]. این سازه‌ها امروزه به نحو چشمگیری در بدنه هواپیماها، بدنه موشک، فضا پیماها، خودروها، کشتی‌ها، قطارها و ساختمان‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۱: یک نمونه سازه ساندویچی باز شده [۱]

یکی از مهمترین مواردی که کاربرد سازه‌های ساندویچی را محدود می‌کند، حساسیت این مواد به برخورد اشیاء خارجی می‌باشد که واقعی‌ترین این برخورد، شامل برخورد چند جسم ضربه زننده به سازه می‌باشد و این حالت نیز محور اصلی پژوهش حاضر است. بنابراین مطالعه رفتار این سازه‌ها تحت بارهای ضربه‌ای با سرعت پایین بسیار جالب و مورد توجه خواهد بود. پس شناسایی رفتار سازه در حین برخورد می‌تواند کمک بسیاری در طراحی آنها بکند. در سال‌های گذشته به دلیل کاربردی بودن این سازه‌ها تحقیقات فراوانی انجام گرفته است که زمینه تحقیقات شامل تحلیل استاتیکی، ارتعاشات آزاد، ارتعاشات اجباری، کماتش و تحلیل سازه‌ها در اثر بار گذاری ضربه‌ای می‌باشد. در ابتدا تحلیل سازه‌های ساندویچی با هسته‌های نرم و انعطاف پذیر محور اصلی تحقیقات قرار گرفته بود و بعداً با شناسایی مواد هدفمند، از این مواد بعنوان هسته استفاده می‌شد که استفاده از

^۱Functionally graded Material

این مواد در سازه‌ها بسیاری از خواص مکانیکی و حرارتی را بهبود می‌بخشید که در این فصل بطور کامل توضیح داده می‌شود.

۱-۲) اهمیت موضوع

همانطور که اشاره شد سازه‌های ساندویچی بدلیل خواص جالبی که دارند، کاربرد بسیار وسیعی پیدا کرده‌اند. در شرایط کاری، این سازه‌ها علاوه بر اینکه تحت بارگذاری استاتیکی قرار می‌گیرند، ممکن است بارهای دینامیکی نیز به آنها وارد شود. به عنوان مثال می‌توان به سقوط وزنه روی این نوع سازه‌ها شامل تیر یا ورق یا هر عضو دیگری در حین کار، سرویس، تعمیر و نگهداری، برخورد قطعات با هم، برخورد سنگریزه‌ها به قطار یا اجسام پرنده، برخورد اجسام موجود در فضا به فضاپیماها و ماهواره‌ها یا برخورد تگرگ‌ها به سازه‌های فضایی اشاره کرد. ضربه ایجاد شده در اثر برخورد اشیاء به سازه‌ها موضوع مهمی می‌باشد که پژوهش حاضر نیز در راستای کامل کردن همین امر می‌باشد. ضربه در اثر برخورد یک شی به یک سازه بوجود می‌آید که به شیء برخورد کننده ضربه زننده و به سازه مورد برخورد، جسم هدف گفته می‌شود. برخورد می‌تواند باعث ایجاد آسیب داخلی در سازه‌ها و نهایتاً تضعیف خصوصیات مکانیکی سازه و و اماندگی آن شود.

هدف اساسی در مطالعه مسائل ضربه، محاسبه فرورفتگی ایجاد شده در ناحیه تماس، تنش‌های به وجود آمده و مهمتر از همه محاسبه تاریخچه نیروی تماس می‌باشد. محاسبه این پارامترها در طراحی آنها کمک شایانی خواهد کرد. مسائل ضربه بر حسب سرعت ضربه زننده به سه دسته تقسیم می‌شوند که در جدول ۱-۱ این تقسیم بندی آورده شده است.

جدول ۱-۱: تقسیم بندی ضربه بر حسب سرعت ضربه زننده [۳]

| نوع ضربه | محدوده سرعت |
|------------|------------------------------|
| سرعت پایین | کوچکتر از ۱۰۰ متر بر ثانیه |
| سرعت متوسط | بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه |
| سرعت بالا | بزرگتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه |

سرعت‌های بالا باعث ایجاد صدمات جدی به سازه‌ها می‌شود که ممکن است در این سرعت، ضربه زننده در داخل جسم هدف نفوذ یا سازه هدف بطور کامل سوراخ شود. بنابراین شناسایی رفتار سازه‌ها در هر دسته از سرعت‌های فوق بسیار مهم می‌باشد که دلیل آن نیز مقاومت کم آنها در راستای ضخامت به دلیل نازک بودن آنها می‌باشد، لذا مقاوم بودن هر چه بهتر رویه‌های بالا و پایین و چسپندگی خوب میان مرز رویه‌ها با هسته در بهبودی رفتار سازه تاثیر زیادی دارد.

مسائل ضربه را می‌توان به سه دسته تقسیم بندی کرد [۳ و ۴]:

۱- بررسی دینامیک ضربه روی سازه، پیش بینی به دست آوردن تاریخچه تابع توزیع نیروی برخورد بر حسب زمان، پاسخ سازه به ضربه و نیز به دست آوردن اثرات پارامترهای مختلف روی دینامیک ضربه تا آستانه تسلیم.

۲- بررسی چگونگی گسترش آسیب حاصل از ضربه و موده‌های مختلف آن و اینکه چه پارامترهایی روی مقاومت سازه در مقابل آسیب و نیز تحمل آسیب اثر دارد.

۳- اثر آسیبه‌های ایجاد شده بر روی استحکام و خواص مکانیکی ماده.

همانطور که از توضیحات قبل برداشت می‌شود، هدف ما بدست آوردن تاریخچه نیروی تماس و دیگر پارامترهای موثر بر مسائل ضربه در اثر چند ضربه‌ها یا به عبارتی بررسی مسایل دسته اول تقسیم بندی فوق می‌باشد.

اجزاء اصلی تحمل کننده بار در هواپیما و سازه‌های فضایی و دیگر تجهیزاتی که از مواد ساندویچی استفاده می‌کنند، همواره در معرض خطرات ناگهانی خصوصاً ضربه قرار دارند، طوری که ممکن است یک شیء یا چند جرم به آنها برخورد کنند و در اثر این ضربه یا ضربه‌ها بدلیل مقاومت کم محل اتصال بین رویه‌ها و هسته و استحکام پایین در این سطوح اتصال، ممکن است در این مرز مشترک جدایش رخ دهد یا به دلیل اختلاف بین سفتی رویه‌ها و هسته، ممکن است در این سطوح تورق^۱ روی دهد. بنابراین حل کردن این مشکلات در اثر پدیده چند ضربه‌ها که بسیار کاربردی و حتی واقعی‌تر از حالت تک ضربه می‌باشد، بسیار مهم است. یک راه حل برای کم کردن این مشکلات استفاده از موادی در هسته ساندویچی‌ها که دارای خواص تابعی باشند، پیشنهاد می‌شوند یا به عبارتی استفاده از FGM ها در هسته سازه‌های ساندویچی پیشنهاد می‌شود که در بخش بعدی در مورد این مواد توضیح داده می‌شود.

۱-۳ سازه‌های ساندویچی

همه ما تا کنون مقطع کارتن‌های مقوایی را دیده‌ایم ولی شاید تاکنون به علت استفاده از آنها فکر نکرده باشیم. یک ساندویچ صنعتی ساده نیز همانند کارتن‌های مقوایی از دو پوسته (صفحات رو کس face sheet) که توسط یک هسته (core) و یا پر کننده از یکدیگر جدا نگه داشته شده‌اند، تشکیل یافته است. با این تفاوت که در آن صفحات روکش از ورق‌های نازک از جنس مقاوم، سفت و

^۱ Delamination

چگال و پر کننده لایه‌ای ضخیم از ماده‌ای که چندین برابر از صفحات روکش ضعیف‌تر و کم وزن‌تر است، می‌باشد.

هسته سازه‌های ساندویچی می‌بایست دارای ویژگی‌های مهم زیر باشد:

الف- در برابر نیروی برشی به اندازه کافی مقاوم و سخت باشد تا در هنگام خمش سازه ای از لغزش صفحات روکش نسبت به یکدیگر تا حد امکان جلوگیری کند.

ب- در برابر نیروهای کششی و فشاری در جهت عمود بر صفحات آنقدر سخت باشد تا اطمینان لازم برای نگهداری صفحات روکش با فاصله تعیین شده از یکدیگر ارائه کند.

اگر شرط اول برقرار نباشد مثل این است که صفحات روکش مانند چند صفحه چندگانه در برابر خمش ایستادگی می‌کنند و بنابراین اثر ساندویچ از بین رفته است. همچنین می‌بایست در نظر داشت که در صورت خمیده بودن سازه (سازه قوس دار) امکان کماتش موضعی صفحات روکش (پدیده چروک خوردگی wrinkling) بیشتر شده و بر قرار بودن شرط دوم مشکل تر خواهد بود. برای ساخت این سازه‌ها اکثراً صفحات روکش را به وسیله چسب به هسته می‌چسبانند.

اگر هسته ساندویچ به قدر کافی محکم و سفت باشد، می‌تواند سهم خوبی در سفتی خمشی ساندویچ داشته باشد، در صورتی که با استفاده از هسته‌های کم چگال (low density) که اغلب بکار می‌روند، از این سهم می‌توان صرف‌نظر کرد. این امر هم چنین باعث ساده‌تر شدن تحلیل تنش و تغییر مکان می‌گردد.

هسته ساندویچ‌ها می‌تواند به جای لایه کم چگال مانند پلاستیک‌های منبسط شده، به صورت‌های کرکره‌ای (corrugated) و لانه زنبوری (honeycomb) نیز باشد.

۱-۴) کاربرد و مزایای سازه‌های ساندویچی

پنل‌های کامپوزیتی ساندویچی، امروزه بطور گسترده‌ای در هوافضا، اتومبیل، لکوموتیو، آسیاب‌های بادی، کشتی‌سازی مخصوصاً عرشه کشتی‌ها و کلاً در صنعت دریایی، در تکنولوژی‌های ورزشی: دوچرخه و ماشین‌های خورشیدی و ...، ساختمان سازی: درب‌ها و کف‌ها و سقف‌ها و... و دیگر صنایع مصرفی به علت ویژگی‌های عالی چون سفتی سطح در مقابل خمیدگی، وزن کم، عایق حرارتی بالا، آسانی شکل‌گیری، ویژگی‌های عالی برش، آسانی ساخت و تعمیر و آکوستیک (صوتی) و... به کار می‌روند. از دیگر کاربرد سازه‌ها عبارتند از چوب اسکی (که در آن پوسته‌های ساخته شده از کامپوزیت کربن-اپوکسی به لایه‌ای از فوم پلی اورتان یا چوب بالسا به عنوان هسته چسبیده‌اند)،

پره‌های توربین گازی (که پوسته‌های ساخته شده از تیتانیوم در روی پره‌ها از هم جدا شده و به هسته‌ای لانه زنبوری متصل شده‌اند) و... [۵].

پنل‌های ساندویچی که برای ساختمان سازی بکار می‌روند از قدیم کاربرد داشته‌اند و معمولاً بارهای کوچک را روی قوس‌های بلند حمل می‌کنند. پنل‌های ساندویچی بکار رفته در ساختمان‌ها مثل پنل‌های ساندویچی هواپیما باید از نظر وزن سبک باشد اما بر خلاف آنها باید ارزان باشند. استفاده از الیاف دارای عملکرد بالا در صفحات ساندویچی ملزم می‌کند که از مصالح ارزان و قابل مقایسه با مصالح ساختمان‌سازی سنتی در حفظ هزینه سازه ساندویچی در بازار مصرف استفاده شود. این یعنی امتیاز اصلی بتون هوا داده سبک وزن در مقایسه با بتون سنتی و هسته‌های اسفنجی موجود در بازار، بتن هوا داده بسیار سبک تر از بتن معمولی است و ویژگی‌های مشابه مواد اسفنجی دارد و بسیار ارزانه‌تر از اسفنج‌های پلیمری است [۵].

سازه‌های ساندویچی که شامل دو ورقه سطحی کامپوزیتی نازک و هسته سبک وزن میانی هستند، امکان طراحی پیوسته با کارایی بسیار بالا را ممکن می‌سازند. بعلاوه، هسته می‌تواند عایق گرما باشد. بنابراین صنعت هواپیما سازی بطور فزاینده‌ای علاقمند پنل‌های ساندویچی برای کاربرد در سازه‌های اولیه مثل بال و بدنه است [۶].

نیاز مستمر به عملکرد فزاینده ساختاری در صنعت هوافضا منجر به افزایش کاربرد کامپوزیت‌ها و تکنولوژی مواد ساندویچی شده است. هر چند با توجه به مزایای درونی مربوط به مواد ساندویچی لانه زنبوری فعلی و گرایش به طراحی سازه‌های عظیم اولیه در هواپیما، نیاز فزاینده به توسعه مواد ساندویچی احساس می‌شود، به منظور دستیابی به این اهداف، هسته‌های سازه چند لایه به عنوان جایگزین ممکن مواد فعلی ساندویچی لانه زنبوری مشخص شده‌اند. اخیراً این هسته‌ها در مرحله‌ی اول برای مصارف آکوستیک مثل کاهش صدا طراحی شده‌اند و در صنعت هوافضای روسیه و نیز انواع صنایع توزیع نفت و گاز اجرا گردیده‌اند. تا امروز تحقیقاتی جزئی منتشر شده است که ویژگی‌های مکانیکی این مواد در کاربردهای صنعتی را توصیف می‌کنند [۷].

محدودیت اصلی کاربرد آنها در صنایع هواپیمایی، عدم درک مکانیسم‌های آسیب در اثر برخورد با سرعت پایین از جمله آسیب نفوذی بر عملکرد ساختاری است.

شاید مهمترین کاربرد ترکیب ساندویچ‌ها در صنایع هوافضا باشد. با توجه به اینکه در این سازه‌ها استحکام به همراه حداقل وزن مورد نظر است، مهمترین کاربرد آنها در وسایط نقلیه است که کاهش وزن همواره مطلوب بوده است. سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری (honeycomb) نسبت به