



دانشکده مکانیک

تحلیل ضربه سرعت پایین روی ورق ساندویچی با هسته  
انعطاف پذیر از جنس روغن هوشمند

نگارش

فهیمة راشد سقاواز

اساتید راهنما: دکتر غلامحسین پایگانه

دکتر کرامت ملک زاده فرد

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مکانیک طراحی کاربردی

شهریور ماه ۱۳۹۲

باسمه تعالی



### تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب فهیمه راشد سقاواز متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو

فهیمه راشد سقاواز

امضاء

---

تهران- لویزان- کد پستی ۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ تلفن: ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰ (داخلی ۲۳۴۷) شماره ۲۲۹۷۰۰۱۱ پست

الکترونیکی [sru@sru.ac.ir](mailto:sru@sru.ac.ir)

شماره: ۱۱/۹۳/۱۲/۱۱۱  
تاریخ: ۹۳/۴/۱۸  
پیوست:



دانشگاه تربیت مدرس

به نام خدا

**صور تجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد**

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد  
خانم: فهیمه راشد سقاواز رشته: طراحی کاربردی تحت عنوان: "تحلیل ضربه  
سرعت پایین روی ورق ساندویچی با هسته انعطاف پذیر از جنس روغن MR" که در تاریخ ۳۱/۶/۹۲ با  
حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت مدرس دبیر شهید رجایی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.  
 قبول (بدرجه عالی) امتیاز: ۲۰ (.....)  دفاع مجدد  مردود.

۱ - عالی (۱۹ - ۲۰)

۲ - بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳ - خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴ - قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵ - غیر قابل قبول (کمتر از ۱۴)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر غلامحسین پایگانه	استادیار	
استاد مشاور	دکتر کرامت ملک راده	دانشیار	
استاد داور داخلی	دکتر علی پورکمالی	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر مهدی زمانیان	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی پورکمالی	استادیار	

دکتر غلامحسین پایگانه

رئیس دانشکده مهندسی مکانیک

تهران، لویزان، کد پستی: ۱۶۷۸۸-۱۵۸۱۱  
صندوق پستی: ۱۶۷۸۵-۱۶۲  
تلفن: ۶-۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۲۳  
Email: sru@sru.ac.ir  
www.srttu.edu

به نام خدا

تقدیم به وجود نازنین آقا امام زمان حضرت مهدی (عج)

و تقدیم به وجود بابرکت حضرت معصومه (س)

که بالطف و عنایت خاص ایشان این کار به پایان رسیده است

امید است که مقبول درگاه حق واقع شود

و

تقدیم به مادرم (همه، مستی ام)

که از سر چشمه محبتش سیراب گشتم

## چکیده:

پایان نامه پیش رو به تحلیل پاسخ ورق ساندویچی با لایه روغن هوشمند MR تحت بار ضربه‌ای با سرعت پایین می‌پردازد. ضرورت انجام این تحقیق با توجه به اثرات شدید بارهای ضربه‌ای روی سازه‌ها، تحلیل این سازه‌ها در مقابل بار ضربه‌ای و طراحی ورق‌های مقاوم به بار ضربه‌ای، بسیار حائز اهمیت می‌باشد و همچنین با توجه به کاربرد روزافزون پانل‌های ساندویچی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا نتایج تحقیق حاضر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از انجام این تحقیق ارائه حل ضربه با سرعت پایین روی ورق ساندویچی با هسته میانی روغن هوشمند MR، بدست آوردن نیروی برخورد و نیز محاسبه توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در رویه‌های ورق، بررسی اثرات پارامترهای هندسی ورق و پارامترهای موثر جسم ضربه‌زننده و اثر شدت میدان مغناطیسی روی پاسخ دینامیکی ورق می‌باشد. بدین منظور آخرین مقالات موجود در زمینه تحلیل دینامیکی ورق‌های تخت با لایه MR مرور و بررسی گردید و معادلات حرکت ورق مستطیلی ساندویچی به کمک اصل هامیلتون استخراج شده است. نتایج حل معادلات بدست آمده با استفاده از روش نویر و مسئله مقدار ویژه به صورت حل تحلیلی بدست آمده است. به کمک مدل جرم و فنر تابع نیروی برخورد بدست آمد و در معادلات دیفرانسیل کوپل شد و تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی استخراج شد و در MATLAB کدنویسی شد. راستی‌آزمایی کیفی و کمی تحقیق توسط مقایسه نتایج تحلیلی با مطالعات قبلی به دست آمد. از نتایج حاصل از این پایان نامه می‌توان جهت طراحی ورق‌های هوشمند با لایه روغن هوشمند استفاده کرد. همچنین از شبیه‌سازی و کدنویسی انجام شده نتیجه می‌شود که عوامل شدت میدان مغناطیسی و ضخامت لایه روغن تأثیر مستقیمی در پاسخ ضربه و نیروی برخورد دارند.

**کلمات کلیدی:** مایعات مگنتورئولوژیکال، ضربه سرعت پایین، ساندویچ، پلیت

## فهرست

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲۰
- ۲-۱- اهداف تحقیق ..... ۲۳

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

- ۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده ..... ۲۵
- ۱-۱-۲- تئوری ورق‌های کامپوزیتی و ساندویچی ..... ۲۵
- ۲-۱-۲- تاریخچه قانون‌های برخورد (ضربه) ..... ۳۱
- ۳-۱-۲- معرفی و شناخت مایعات هوشمند ..... ۳۹
- ۱-۳-۱-۲- مقدمه‌ای بر خواص مواد هوشمند ..... ۳۹
- ۲-۳-۱-۲- مواد هوشمند ..... ۳۹
- ۳-۳-۱-۲- انواع مواد هوشمند ..... ۳۹
- ۴-۳-۱-۲- سیال‌های هوشمند و انواع آن ..... ۴۱
- ۵-۳-۱-۲- فروسیال‌ها ..... ۴۱
- ۶-۳-۱-۲- سیال‌های الکترورنولوژیکال (ER) ..... ۴۳
- ۷-۳-۱-۲- سیال‌های مگنتورنولوژیکال (MR) ..... ۴۳
- ۸-۳-۱-۲- تاریخچه سیال‌های هوشمند ..... ۴۵
- ۹-۳-۱-۲- رفتار و ویژگی‌ها و مشخصات سیال‌های هوشمند ..... ۴۶
- ۱۰-۳-۱-۲- مدل پلاستیک بینگهام ..... ۴۷

فصل سوم: بررسی رفتار ارتعاشی ورق ساندویچی با هسته MR

- ۳-۱- مدل سازی ورق ساندویچی با هسته MR و روابط پایه‌ای ..... ۵۱
- ۳-۲-۱- معادلات حرکت و شرایط مرزی ..... ۵۴
- ۳-۲- بررسی ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی با هسته MR ..... ۵۸
- ۳-۳- اعتبارسنجی معادلات و نتایج عددی ..... ۶۱
- ۳-۴- بررسی تغییر فرکانس‌ها و ضرایب استهلاک پنل ساندویچی در ابعاد ضربه ..... ۶۶
- ۳-۴-۱- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات شدت میدان ..... ۶۷
- ۳-۴-۲- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات نسبت ضرایب منظری ..... ۶۸
- ۳-۴-۳- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات نسبت  $h_c/h$  ..... ۶۹
- ۳-۴-۴- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات مقدار جرم و سرعت ضربه زنده ..... ۷۰
- ۳-۴-۵- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  ..... ۷۱
- ۳-۴-۶- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات نسبت  $a/h$  ..... ۷۲
- ۳-۴-۷- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  ..... ۷۳
- ۳-۴-۸- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات  $h_2$  و  $h_1$  ..... ۷۴
- ۳-۴-۹- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات  $h_c$  ..... ۷۵
- ۳-۴-۱۰- بررسی تغییر فرکانس و ضریب استهلاک با تغییرات نسبت  $h_1/h_2$  ..... ۷۶

فصل چهارم: پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی با هسته MR تحت بار ضربه‌ای با سرعت آرام

- ۴-۱- مقدمه ..... ۷۸
- ۴-۲- مبانی و مفاهیم ضربه ..... ۷۹
- ۴-۳- تحلیل تک ضربه ..... ۸۲
- ۴-۳-۱- مدل‌های ضربه ..... ۸۳
- ۴-۳-۱-۱- مدل المان محدود ..... ۸۳



۸۴	..... مدل بالانس انرژی ۲-۱-۳-۴
۸۶	..... مدل جرم و فنر ۳-۱-۳-۴
۸۷	..... محاسبه‌ی جرم موثر پوسته ۱-۳-۱-۳-۴
۹۲	..... مدل جرم و فنر بهبود یافته ۴-۱-۳-۴
۹۳	..... مدل کامل ۵-۱-۳-۴
۹۴	..... تحلیل چند ضربه ۴-۴
۹۴	..... مدل‌های ضربه ۱-۴-۴
۹۴	..... مدل جرم و فنر بهبود یافته ۱-۱-۴-۴
۱۰۰	..... مدل کامل ۲-۱-۴-۴
۵-۴	..... مدل پیشنهاد شده در این پایان‌نامه برای تحلیل ضربه سرعت پایین روی ورق ساندویچی با هسته
۱۰۲	..... انعطاف پذیر از جنس روغن MR ۱۰۲

#### فصل پنجم: بحث و نتیجه‌گیری

۱-۵	..... نتایج حاصل از آنالیز دینامیکی ورق ساندویچی با هسته میانی روغن هوشمند MR تحت بار ضربه‌ای
۱۰۵	..... با سرعت پایین ۱۰۵
۱-۱-۵	..... تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی مختلف ورق ۱۰۵
۱-۱-۱-۵	..... تاثیر تغییرات نسبت $a/h$ ورق ساندویچی بر روی $F$ (Contact force)، خیز ورق $(\Delta_2)$ و خیز
۱۰۶	..... ضربه‌زننده $(\Delta_1)$ ۱۰۶
۲-۱-۱-۵	..... تاثیر تغییرات نسبت $h_c/h$ ورق ساندویچی بر روی $F$ (Contact force)، خیز ورق $(\Delta_2)$ و خیز
۱۰۹	..... ضربه‌زننده $(\Delta_1)$ ۱۰۹
۳-۱-۱-۵	..... تاثیر تغییرات نسبت $(a/b)$ ورق ساندویچی بر روی $F$ (Contact force)، خیز ورق $(\Delta_2)$ و خیز
۱۱۲	..... ضربه‌زننده $(\Delta_1)$ ۱۱۲

- ۵-۱-۱-۴- تاثیر تغییرات نسبت  $(h_c/h_1)$  ورق ساندویچی بر روی  $F$  (Contact force)، خیز ورق  $(\Delta_2)$  و خیز ضربه‌زننده  $(\Delta_1)$  ..... ۱۱۴
- ۵-۱-۱-۵- تاثیر تغییرات نسبت  $(h_1/h_2)$  ورق ساندویچی بر روی  $F$  (Contact force)، خیز ورق  $(\Delta_2)$  و خیز ضربه‌زننده  $(\Delta_1)$  ..... ۱۱۶
- ۵-۱-۱-۶- تاثیر تغییرات نسبت  $(h_c)$  ورق ساندویچی بر روی  $F$  (Contact force)، خیز ورق  $(\Delta_2)$  و خیز ضربه‌زننده  $(\Delta_1)$  ..... ۱۱۹
- ۵-۱-۱-۷- تاثیر تغییرات ضخامت رویه‌ها  $(h_1$  و  $h_2)$  ورق ساندویچی بر روی  $F$  (Contact force)، خیز ورق  $(\Delta_2)$  و خیز ضربه‌زننده  $(\Delta_1)$  ..... ۱۲۱
- ۵-۱-۱-۸- اثر تاثیر تغییرات نسبت  $(E_2/E_1)$  ورق ساندویچی بر روی  $F$  (Contact force)، خیز ورق  $(\Delta_2)$  و خیز ضربه‌زننده  $(\Delta_1)$  ..... ۱۲۳
- ۵-۱-۱-۹- اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر روی  $F$  (Contact force)، خیز ورق  $(\Delta_2)$  و خیز ضربه‌زننده  $(\Delta_1)$  ..... ۱۲۶
- ۵-۱-۲- تاثیر تغییرات پارامترهای جسم ضربه‌زننده بر ورق ساندویچی با هسته هوشمند ..... ۱۲۸
- ۵-۱-۲-۱- تاثیر پارامتر سرعت ضربه‌زننده بر ورق ساندویچی با هسته هوشمند ..... ۱۲۹
- ۵-۱-۲-۲- تاثیر پارامتر جرم ضربه‌زننده بر ورق ساندویچی با هسته هوشمند ..... ۱۳۲

#### فصل ششم: نتایج و پیشنهادها

- ۶-۱- نتایج ..... ۱۳۵
- ۶-۲- پیشنهادها ..... ۱۳۶
- مراجع و پیوست ..... ۱۳۷

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ ویژگی‌های چند نوع فروسیال تجاری با کاربرد هدایت حرارتی ..... ۴۲
- جدول ۲-۲ مشخصات سه نوع مختلف از سیال‌های MR ..... ۴۴
- جدول ۳-۲ مقایسه خواص انواع سیال‌های هوشمند ..... ۴۹
- جدول ۱-۳ خواص مواد به‌کار رفته در مساله ..... ۶۲
- جدول ۲-۳ مشخصات هندسی پنل ساندویچی ..... ۶۲
- جدول ۳-۳ همگرایی فرکانس طبیعی اول به فرکانس طبیعی اول ورق ایزوتروپ با کاهش ضخامت لایه‌ی MR ..... ۶۳
- جدول ۴-۳ فرکانس طبیعی اول و ضریب استهلاک مودال متناظر برای چهار مود اول ارتعاشی برای ضخامت هسته، شدت میدان و ضرابی منظری متفاوت ..... ۶۵
- جدول ۵-۳ دیتای پارامترهای مختلف ..... ۶۶
- جدول ۱-۵ خواص هندسی و مکانیکی به‌کار رفته در مساله ..... ۱۰۶
- جدول ۲-۵ اثر نسبت طول به ضخامت ورق روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۰۸
- جدول ۳-۵ اثر نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل ورق، روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۱۰
- جدول ۴-۵ اثر نسبت طول به عرض ورق ساندویچی روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۱۳
- جدول ۵-۵ اثر نسبت  $h_c/h_1$  ورق ساندویچی روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۱۵

- جدول ۵-۶ اثر نسبت  $h_1/h_2$  ورق ساندویچی روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۱۷
- جدول ۵-۷ اثر تغییرات ضخامت لایه هوشمند ورق ساندویچی روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۲۰
- جدول ۵-۸ اثر تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  ورق ساندویچی روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۲۴
- جدول ۵-۹ اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی ورق ساندویچی روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۲۶
- جدول ۵-۱۰ اثر تغییرات سرعت ضربه‌زننده روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۳۰
- جدول ۵-۱۱ اثر تغییرات جرم ضربه‌زننده روی فرکانس طبیعی پایه، بیشینه نیرو، بیشینه خیز ضربه‌زننده و بیشینه خیز ورق ..... ۱۳۳

## فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات شدت میدان ..... ۶۷
- نمودار ۲-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات شدت میدان ..... ۶۷
- نمودار ۳-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات نسبت ضرایب منظری ..... ۶۸
- نمودار ۴-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات نسبت ضرایب منظری ..... ۶۹
- نمودار ۵-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h$  ..... ۶۹
- نمودار ۶-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h$  ..... ۷۰
- نمودار ۷-۳ نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  ..... ۷۱
- نمودار ۸-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  ..... ۷۱
- نمودار ۹-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/h$  ..... ۷۲
- نمودار ۱۰-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/h$  ..... ۷۲
- نمودار ۱۱-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  ..... ۷۳
- نمودار ۱۲-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  ..... ۷۳
- نمودار ۱۳-۳ c و a تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات  $h_2$  و  $h_1$  ..... ۷۴
- نمودار ۱۳-۳ d و b تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات  $h_2$  و  $h_1$  ..... ۷۴
- نمودار ۱۴-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات  $h_c$  ..... ۷۵
- نمودار ۱۵-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات  $h_c$  ..... ۷۵
- نمودار ۱۶-۳ تغییرات فرکانس طبیعی پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_1/h_2$  ..... ۷۶
- نمودار ۱۷-۳ تغییرات ضریب استهلاک پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_1/h_2$  ..... ۷۶
- نمودار ۱-۵ تغییرات بیشینه نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/h$  در شدت میدان ۵۰۰ ..... ۱۰۶
- گاوس ..... ۱۰۶

- نمودار ۲-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/h$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس..... ۱۰۷
- نمودار ۳-۵ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/h$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۰۷
- نمودار ۳-۵ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/h$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۰۸
- نمودار ۴-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۰۹
- نمودار ۵-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۱۰
- نمودار ۶-۵ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h$  در شدت میدان مختلف ..... ۹۳
- نمودار ۷-۵ تغییرات بیشینه خیز ورق با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h$  در شدت میدان مختلف ..... ۱۱۱
- نمودار ۸-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت ضرایب منظری ..... ۱۱۲
- نمودار ۹-۵ تغییرات بیشینه نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت ضرایب منظری ..... ۱۱۲
- نمودار ۱۰-۵ تغییرات خیز ضربه‌زننده با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/b$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۱۳
- نمودار ۱۱-۵ تغییرات خیز پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $a/b$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۱۴
- نمودار ۱۲-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۱۴

- نمودار ۵-۱۳ تغییرات بیشینه نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۱۵
- نمودار ۵-۱۴ a تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۱۶
- نمودار ۵-۱۴ b تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_c/h_1$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۱۶
- نمودار ۵-۱۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_1/h_3$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۱۶
- نمودار ۵-۱۶ تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_1/h_3$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۱۷
- نمودار ۵-۱۷ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_1/h_3$  در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۱۸
- نمودار ۵-۱۸ تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $h_1/h_3$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۱۸
- نمودار ۵-۱۹ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت مایع هوشمند در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۱۹
- نمودار ۵-۲۰ تغییرات بیشینه نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت هسته در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۲۰
- نمودار ۵-۲۱ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت هسته در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۲۰
- نمودار ۵-۲۲ a تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت لایه هوشمند .. ۱۲۱
- نمودار ۵-۲۲ b تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت لایه هوشمند ..... ۱۲۱

- نمودار ۲۳-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت رویه بالایی در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۲۱
- نمودار ۲۴-۵ تغییرات بیشینه نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت رویه بالایی در شدت میدان ۵۰۰ گاوس ..... ۱۲۲
- نمودار ۲۵-۵ a- تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت رویه بالایی ..... ۱۲۲
- نمودار ۲۵-۵ b- تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت رویه بالایی ..... ۱۲۲
- نمودار ۲۶-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  در شدت میدان مغناطیسی ۵۰۰ G ..... ۱۲۳
- نمودار ۲۷-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۲۴
- نمودار ۲۸-۵ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۰۷
- نمودار ۲۹-۵ تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات نسبت  $E_2/E_1$  در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۲۵
- نمودار ۳۰-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات شدت میدان ..... ۱۲۶
- نمودار ۳۱-۵ تغییرات ماکزیمم نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات شدت میدان ..... ۱۲۷
- نمودار ۳۲-۵ a- تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات شدت میدان مغناطیسی ..... ۱۲۸
- نمودار ۳۲-۵ b- تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات شدت میدان مغناطیسی ..... ۱۲۸
- نمودار ۳۳-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات سرعت ضربه‌زننده در شدت میدان مغناطیسی ۵۰۰ G ..... ۱۲۹



- نمودار ۳۴-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات سرعت ضربه‌زننده در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۳۰
- نمودار ۳۵-۵ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت رویه بالایی در شدت میدان مغناطیسی ۵۰۰ گاوس ..... ۱۳۱
- نمودار ۳۶-۵ تغییرات بیشینه خیز پنل با هسته MR با تغییرات ضخامت رویه بالایی در شدت میدان مغناطیسی ۵۰۰ گاوس ..... ۱۳۱
- نمودار ۳۷-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات جرم ضربه‌زننده در شدت میدان مغناطیسی ۵۰۰G ..... ۱۳۲
- نمودار ۳۸-۵ تغییرات نیروی تماس پنل با هسته MR با تغییرات جرم ضربه‌زننده در شدت میدان مغناطیسی مختلف ..... ۱۳۲
- نمودار ۳۹-۵ تغییرات بیشینه خیز ضربه‌زننده پنل با هسته MR با تغییرات جرم ضربه‌زننده ..... ۱۳۳

## فهرست شکل‌ها

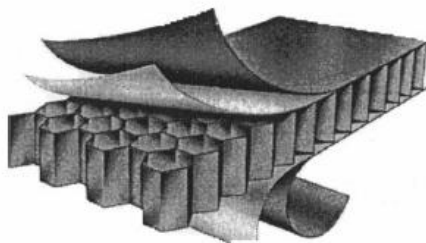
- شکل ۱-۱ یک نمونه سازه ساندویچی باز شده ..... ۲۰
- شکل ۱-۲ تغییر شکل یک المان بر اساس تئوری کلاسیک ..... ۲۶
- شکل ۲-۲ تغییر شکل ورق بر اساس تئوری FSDT ..... ۲۸
- شکل ۳-۲ تغییر شکل‌ها در یک المان بر طبق تئوری مرتبه سه برشی ..... ۲۹
- شکل ۴-۲ آهنگ تغییر برش یک سیال نیوتونی متناسب با تنش ..... ۴۶
- شکل ۵-۲ آهنگ تنش برش نسبت به کرنش برش برای مدل پلاستیک بینگهام ..... ۴۷
- شکل ۱-۳ هندسه‌ی مساله ورق ساندویچی با هسته‌ی MR ..... ۵۱
- شکل a-۲-۳ مقطع ورق ساندویچی قبل و بعد از تغییر شکل در صفحه xz ..... ۵۳
- شکل b-۲-۳ مقطع ورق ساندویچی قبل و بعد از تغییر شکل در صفحه yz ..... ۵۳
- شکل ۱-۴ دسته‌بندی انواع پاسخ‌های سازه‌های کامپوزیتی هنگام برخورد با جسم ضربه زننده ۱ ..... ۸۰
- شکل ۲-۴ مقایسه بین ضربه با جرم بزرگ (شکل a) و ضربه با جرم کوچک (شکل b) ..... ۸۲
- شکل ۳-۴ مدل جرم و فنر دو درجه آزادی ..... ۸۶
- شکل ۴-۴ مدل جرم و فنر دو درجه آزادی ..... ۹۵

# فصل اوّل

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه:

سازه‌های ساندویچی به سازه‌هایی اطلاق می‌شود که متشکل از دو رویه (skin) سفت و قوی و یک هسته (core) نرم و انعطاف‌پذیر می‌باشد که این رویه‌ها به وسیله این 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<sup>۱</sup> 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، فضاپیماها، خودروها، کشتی‌ها، قطارها و ساختمان‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.



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