بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

خانم نسا پیر محمدی پایان نامه ٦ واحدی خود را با عنوان بررسی تحلیلی و تجربی رفتار بالستیکی صفحات ساندویچی با هسته لانه زنبوری در تاریخ ۱۳۹۲/۹/۲۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	
استاد مشاور	دکتر محمد حسین پل	استادیار	
استاد ناظر	دکتر اکبر علی بیگلو	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مجتبی صدیقی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر اکبر علی بیگلو	دانشیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب نساء پیرمحمدی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک ورودی سال تحصیلی ۱۳۹۰ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضاء .....

تاریخ: ۹۲/۶/۲۳

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی مکانیک است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر غلامحسین لیاقت، مشاوره جناب آقای دکتر محمد حسین پل، از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب نسا پیرمحمدی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: نسا پیرمحمدی

تاریخ و امضاء ۹۲/۱۰/۲۳

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

بررسی تحلیلی و تجربی رفتار بالستیکی صفحات ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری

ارائه دهنده:

نسا پیرمحمّدی

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین لیاقت

استاد مشاور:

دکتر محمد حسین پل

آذر ماه ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر، مادر و همسر مهربانم

تقدیر و تشکر

قبل از هر چیز بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر لیاقت بدلیل راهنمایی و نظارت مستمر در انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را ابراز نموده و برای ایشان آرزوی موفقیت و سلامت می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر پل، که به عنوان استاد مشاور تلاش‌های شایانی در هدایت و انجام آزمون‌های بالستیک نمودند، قدردانی می‌کنم.

در انتها از هم فکری جناب آقای دکتر صبوری در قسمت نرم افزاری و همچنین حل تحلیلی کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این پایان‌نامه مسئله نفوذ در سازه ساندویچی ساخته شده از رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی و هسته لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم مورد بررسی قرارگرفته است. در این بررسی مسئله نفوذ به دو روش تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این دو روش با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده است. آزمایش‌های بالستیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده با پرتابه سرتخت به جرم ۸/۵ gr و قطر ۱۰ mm در سرعت‌های مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت برخورد انرژی بیشتری توسط سازه ساندویچی جذب شده است. الگوهای تغییر شکل و مکانیزم‌های جذب انرژی بر مبنای مشاهدات صورت گرفته از آزمایش‌های بالستیک شامل: حرکت دینامیکی هدف، خمش و تغییر فرم سازه، لایه شدگی رویه‌های کامپوزیتی، شکست کششی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی، جدا شدن رویه‌ها از هسته لانه‌زنبوری، برش لانه‌زنبوری، شکل‌گیری پلاگ در رویه جلویی و تشکیل پتال در رویه پشتی می‌باشد. در قسمت تحلیلی پس از بررسی کار محققین در این زمینه در نهایت یک مدل بر اساس روش انتشار موج درنظر گرفته شده است. این مدل انرژی‌های شامل جدایش رویه و هسته و لایه‌شدگی رویه‌های کامپوزیتی را درنظر نمی‌گیرد. با اصلاح موارد گفته شده و درنظرگرفتن اثر نرخ کرنش در خواص مکانیکی، مدل تحلیلی مناسب ارائه شد. سپس معادله دیفرانسیل غیر خطی بدست آمده، با درنظرگیری وقوع تخریب‌های موضعی و انرژی‌های جذب شده مورد حل قرار گرفت. با مقایسه پاسخ تحلیلی و نتایج تجربی، می‌توان اظهار داشت که روش تحلیلی پیشنهادی، می‌تواند به خوبی فرایند نفوذ در سازه ساندویچی را مدل نماید. در قسمت عددی، فرایند نفوذ توسط کد اجزاء محدود LS-DYNA مورد تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور، مدل دقیقی از گلوله و هدف تهیه شده است. این مدل، توانایی تعیین مودهای تخریب عمومی و موضعی و مکانیزم‌های جذب انرژی حاکم بر نفوذ گلوله را دارا می‌باشد. به علاوه، این مدل عددی، با دقت خوبی می‌تواند سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده در سازه ساندویچی را تعیین نماید. همچنین نتایج روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی، انطباق خوبی با یکدیگر دارند.

واژگان کلیدی: سازه ساندویچی، لانه‌زنبوری، کامپوزیت، ضربه سرعت بالا، سرعت حد بالستیک، روش تحلیلی، روش اجزاء محدود

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فهرست جدول‌ها ..... ح

فهرست شکل‌ها ..... خ

فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ذ

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ ضرورت انجام پژوهش ۲

۱-۲ اهداف پایان‌نامه ۳

۱-۲-۱ قسمت تجربی ۳

۱-۲-۱-۱ طراحی آزمایش‌ها ۳

۱-۲-۱-۲ مراحل انجام روش تجربی ۳

۱-۲-۱-۳ دستاوردهای تجربی ۳

۱-۲-۲ قسمت تحلیلی ۴

۱-۲-۲-۱ مراحل انجام روش تحلیلی ۴

۱-۲-۲-۲ دستاوردهای روش تحلیلی ۴

۱-۲-۳ قسمت عددی ۴

۱-۲-۳-۱ مراحل روش عددی ۴

۱-۲-۳-۲ دستاوردهای روش عددی ۴

۱-۳ جنبه‌های نوآوری پایان‌نامه ۵

۱-۳-۱ در حوزه تجربی ۵

۱-۳-۲ در حوزه تحلیلی ۵

۱-۳-۳ در حوزه عددی ۵

۱-۴ چشم انداز کلی پایان‌نامه ۶

فصل دوم: معرفی لانه‌زنبوری و خواص آن ۷

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ ایده اولیه ۸

۲-۳ اصطلاحات مورد استفاده در لانه‌زنبوری‌ها ۹

۲-۳ دلایل استفاده از لانه‌زنبوری ۹

۲-۴ کاربردهای لانه‌زنبوری ۱۱

۲-۴-۱ هواپیما ۱۱

۲-۴-۲ هوافضا ۱۲
۲-۴-۳ حمل و نقل ۱۳
۲-۴-۴ ساختمان ۱۳
۲-۴-۵ تجهیزات ورزشی ۱۳
۲-۴-۶جهت دهی به جریان هوا ۱۴
۲-۴-۷ کاربردهای صوتی ۱۴
۲-۴-۹ آنتن رادار ۱۴
۲-۵ روش‌های ساخت ۱۵
۲-۵-۱ روش انبساطی ۱۵
۲-۵-۲ روش کرکره‌ای ۱۵
۲-۶ انواع لانه‌زنبوری‌ها ۱۶
۲-۶-۱ انواع لانه‌زنبوری از نظر جنس ۱۶
۲-۶-۲ انواع لانه‌زنبوری‌ها از نظر شکل سلول‌ها ۱۷
۲-۷ خواص مکانیکی لانه‌زنبوری ۱۸
۲-۸ انتخاب لانه‌زنبوری ۱۹
۲-۹ مکانیزم‌های تغییر شکل در لانه‌زنبوری‌ها ۱۹
۲-۹-۱ تغییر شکل صفحه‌ای ۱۹
۲-۹-۲ تغییر شکل خارج از صفحه ۲۰
فصل سوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۲۲
۳-۱ مقدمه ۲۳
۳-۲ مطالعات مربوط به نفوذ در اهداف کامپوزیتی ۲۳
۳-۳ مطالعات مربوط به نفوذ در لانه‌زنبوری ۲۷
۳-۴ مطالعات مربوط به نفوذ در صفحه ساندویچی ۲۸
۳-۵ وابستگی خواص مکانیکی به نرخ کرنش ۳۳
۳-۵-۱ آلومینیم ۳۳
۳-۵-۲ کامپوزیت شیشه/ اپوکسی ۳۴
۳-۵-۳ لایه فصل مشترک ۳۴
۳-۶ جمع بندی ۳۴
فصل چهارم: ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها ۳۵
۴-۱ مقدمه ۳۶

۴-۲ فرآیند ساخت و جنس نمونه‌های ساخته شده ۳۶
۴-۲-۱ جنس مواد ۳۶
۴-۲-۲ ابعاد نمونه‌ها و اتصال اجزای ساندویچ ۳۷
۴-۳ گلوله و مشخصات آن ۳۷
۴-۴ خواص مکانیکی نمونه‌ها ۳۸
۴-۵ آزمایش‌های بالستیک ۴۰
۴-۶ تهیه منحنی کالیبراسیون دستگاه تفنگ گازی ۴۲
فصل پنجم: حل تحلیلی ۴۳
۵-۱ مقدمه ۴۴
۵-۲ مدل تحلیلی ۴۴
۵-۳ مکانیزم‌های جذب انرژی ۴۷
۵-۴ فرمول بندی مسئله ۴۸
۵-۴-۱ انتشار موج از طریق ضخامت ۴۸
۵-۵ مرحله اول نفوذ ۴۹
۵-۵-۱ معادله لاگرانژ ۵۰
۵-۵-۲ انرژی جنبشی ۵۰
۵-۵-۳ انرژی پتانسیل ۵۲
۵-۵-۴ معادله حرکت ۵۳
۵-۶ مرحله دوم نفوذ ۵۴
۵-۶-۱ انرژی جنبشی ۵۴
۵-۶-۲ انرژی پتاسیل ۵۵
۵-۶-۳ معادله حرکت ۵۵
۵-۷ مرحله سوم نفوذ ۵۵
۵-۷-۱ انرژی جنبشی ۵۵
۵-۷-۲ انرژی پتانسیل ۵۶
۵-۷-۳ معادله حرکت ۵۶
۵-۸ مرحله چهارم نفوذ ۵۶
۵-۸-۱ انرژی جنبشی ۵۷
۵-۸-۲ انرژی پتانسیل ۵۷
۵-۸-۳ معادله حرکت ۵۷

۵-۹ تخریب قسمت کامپوزیتی ۵۷
۵-۱۰ برش قسمت لانه‌زنبوری ۵۹
۵-۱۱ لایه‌شدگی و جدایش بین لایه‌ای در رویه جلویی ۶۰
۵-۱۲ لایه‌شدگی و جدایش بین لایه‌ای در رویه پشتی ۶۱
۵-۱۳ انرژی شکست رویه پشتی ۶۱
۵-۱۴ مقادیر چقرمگی شکست ۶۲
۵-۱۵ روش حل ۶۲
۵-۱۵-۱ مرحله اول ۶۳
۵-۱۵-۲ مرحله دوم ۶۴
۵-۱۵-۳ مرحله سوم ۶۴
۵-۱۵-۴ مرحله چهارم ۶۴
۵-۱۶ بررسی وابستگی روش حل به گام‌های زمانی و مکانی ۶۵
فصل ششم: تحلیل عددی ۶۷
۶-۱ مقدمه ۶۸
۶-۲ نرم افزارها و کد عددی مورد استفاده ۶۸
۶-۳ مراحل ساخت مدل اجزاء محدود ۶۸
۶-۳-۱ شرح مدل ۶۸
۶-۳-۲ المان مورد استفاده ۷۰
۶-۳-۳ مدل مواد مورد استفاده ۷۱
۶-۳-۴ تعریف تماس میان قسمت‌های مختلف ۷۲
۶-۳-۴-۱ تماس میان گلوله و هریک از لایه‌های هدف ۷۲
۶-۳-۴-۲ تماس بین لایه‌های مجاور رویه‌های کامپوزیتی ۷۲
۶-۳-۴-۳ تماس میان لایه‌های غیر مجاور هدف ۷۳
۶-۳-۴-۴ تماس بین رویه‌های کامپوزیتی و هسته لانه‌زنبوری ۷۳
۶-۳-۵ اعمال شرایط مرزی ۷۳
۶-۳-۶ اعمال شرایط اولیه ۷۳
۶-۳-۷ زمان حل ۷۳
۶-۳-۸ سایر تنظیم‌ها ۷۳
۶-۳-۸-۱ اصلاح ضریب مقیاس گام زمانی ۷۳
۶-۳-۸-۲ درنظرگیری جرم المان حذف شده ۷۴
۶-۳-۹ همگرایی مش ۷۴

فصل هفتم: نتایج و بحث ۷۶
۷-۱ مقدمه ۷۷
۷-۲ مشاهدات و نتایج آزمایش‌های بالستیک ۷۷
۷-۲-۱ قائم بودن نفوذ ۷۷
۷-۲-۲ عدم تغییر فرم گلوله پس از نفوذ ۷۷
۷-۲-۳ حد بالستیک سازه ساندویچی ۷۷
۷-۲-۴ مکانیزم‌های شکست ۸۰
۷-۳ نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی ۸۱
۷-۳-۱ ارائه نتایج ۸۱
۷-۴ نتایج بدست آمده از تحلیل عددی ۸۳
۷-۴-۱ سرعت باقی‌مانده و حد بالستیک ۸۳
۷-۴-۲ تخریب پیش رونده در سازه ساندویچی ۸۴
۷-۴-۳ بحث و بررسی نتایج عددی بدست آمده ۸۶
۷-۵ مقایسه نتایج بدست آمده از سه روش ۸۶
۷-۵-۱ سرعت حد بالستیک ۸۶
۷-۵-۱ بحث در مورد علت اختلاف نتایج بدست آمده از سه دیدگاه ۸۷
فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۸۹
۸-۱ نتیجه گیری ۹۰
۸-۲ ارائه پیشنهادهایی برای ادامه فعالیت‌های پژوهشی ۹۱
مراجع ۹۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ بازده ساندویچ لانه‌زنبوری ۱۰
جدول ۴-۱ ویژگی‌های آلومینیوم استفاده شده در لانه‌زنبوری ۳۷
جدول ۴-۲ مشخصات پرتابه ۳۸
جدول ۴-۳ خواص مکانیکی اجزاء سازه لانه‌زنبوری ۳۹
جدول ۶-۱ تعداد المان‌های مورد استفاده در هر قسمت ۷۵
جدول ۶-۲ مشخصات کلی مدل شبیه سازی شده ۷۵
جدول ۷-۱ نتایج آزمایش‌های بالستیک بر روی صفحات ساندویچی ۷۸
جدول ۷-۲ سرعت خروجی پرتابه هنگام نفوذ به سازه ساندویچی توسط حل تحلیلی ۸۱
جدول ۷-۳ درصد مشارکت هر یک از مکانیزم‌های جذب انرژی برای سازه ساندویچی ۸۲
جدول ۷-۴ سرعت خروجی پرتابه هنگام نفوذ به سازه ساندویچی توسط حل عددی ۸۳
جدول ۷-۵ مقایسه سرعت حد بالستیک برای روش‌های مختلف ۸۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ تصویر شماتیک لانه‌زنبوری‌ها ۹
شکل ۲-۲ مقایسه آزمایش‌های خستگی صفحه لانه‌زنبوری با یک سازه پوسته ای مقاوم شده ۱۰
شکل ۲-۳ لانه‌زنبوری در هواپیماهای بویینگ ۱۱
شکل ۲-۴ استفاده لانه‌زنبوری در هواپیمای بویینگ ۷۸۷ ..... ۱۱
شکل ۲-۵ پره هلی کوپتر MI24 ..... ۱۲
شکل ۲-۶ استفاده از لانه‌زنبوری در شاتل فضایی ۱۲
شکل ۲-۷ لانه‌زنبوری استفاده شده در اسکی برف ۱۳
شکل ۲-۸ تصحیح جریان هوا به وسیله لانه‌زنبوری ۱۴
شکل ۲-۹ روش تولید انبساطی لانه‌زنبوری ۱۵
شکل۲-۱۰ روش تولید کرکره‌ای لانه‌زنبوری ۱۶
شکل ۲-۱۱ اشکال مختلف سلول‌های لانه‌زنبوری ۱۸
شکل ۲-۱۲ یک صفحه لانه‌زنبوری با محورهای قردادی آن ۱۹
شکل ۲-۱۳ منحنی تنش-کرنش لانه‌زنبوری آلومینیومی در حالت فشار در جهت L ۲۰
شکل ۲-۱۴ منحنی تنش-کرنش لانه‌زنبوری در حالت کشش در جهت L ۲۰
شکل۲-۱۵ منحنی تنش-کرنش فشاری در جهت محوری T ۲۱
شکل ۴-۱ الیاف استفاده شده در ساخت کامپوزیت ۳۶
شکل ۴-۲ کامپوزیت ساخته شده ۳۶
شکل ۴-۳ لانه‌زنبوری استفاده شده ۳۷
شکل ۴-۴ پرتابه استفاده شده ۳۸
شکل۴-۵ منحنی شماتیک تنش- کرنش لانه‌زنبوری ۳۸
شکل ۴-۶ نمودار نیرو-جابجایی لانه‌زنبوری ۳۹
شکل ۴-۷ تفنگ گازی ۴۱
شکل ۴-۸ طرح شماتیک تفگ گازی ۴۲
شکل ۴-۹ منحنی کالیبراسیون تفنگ گازی ۴۲
شکل ۵-۱ الف) ضربه سرعت پایین ب) ضربه سرعت بالا و پ) ضربه بالستیک ۴۵
شکل ۵-۲ ضربه پرتابه به سازه ساندویچی ۴۵

شکل ۵-۳ تغییر شکل‌های موضعی و سراسری سازه ساندویچی الف) فرورفتگی موضعی، ب) تغییر شکل خمشی- برشی سراسری و پ) نمایش همزمان تغییر شکل‌های موضعی و سراسری ۴۶
شکل ۵-۴ نفوذ و سوراخ شدن ساندویچ الف) شکست رویه جلویی، ب) شکست برشی و له شدن موضعی هسته، پ) گسیختگی رویه پشتی و ت) خروج پرتابه و پلاگ ۴۷
شکل ۵-۵ درجه آزادی مدل تحلیلی الف) یک درجه آزادی برای تغییر شکل موضعی و ب) دو درجه آزادی برای تغییر شکل موضعی و سراسری ۴۹
شکل ۵-۶ انتشار موج الاستیک و پلاستیک در هسته طی مرحله اول الف) ناحیه الاستیک و پلاستیک و ب) سرعت ذرات ۵۱
شکل ۵-۷ نمایش اغراق آمیز از تابع شکل مورد استفاده ۵۳
شکل ۵-۸ کوچکترین طول ترک برای نفوذ پرتابه در رویه پشتی ۶۱
شکل ۵-۹ تغییرات خیز سازه ساندویچی در مرحله اول بر حسب زمان نفوذ در گام‌های زمانی مختلف ۶۵
شکل ۵-۱۰ فلورچارت مرحله اول حل ۶۶
شکل ۶-۱ ابعاد لانه‌زنبوری بر حسب میلیمتر ۶۹
شکل ۶-۲ لانه‌زنبوری مدل شده در نرم افزار LS-DYNA ۶۹
شکل ۶-۳ مدل ساخته شده شامل گلوله، لانه‌زنبوری و رویه‌های کامپوزیتی ۷۰
شکل ۶-۴ نمای نزدیک تر از لایه‌های کامپوزیتی ۷۰
شکل ۶-۵ ساختار المان‌ها مورد استفاده در مدل‌سازی ۷۱
شکل ۶-۶ مش بندی نهایی که برای تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته است ۷۴
شکل ۶-۷ نمای نزدیک از مش‌بندی گلوله و محل اصابت آن به هدف ۷۵
شکل ۷-۱ سمت چپ جلوی هدف و سمت راست پشت هدف برای سرعت‌های ورودی (m/s): الف) ۱۸۷، ب) ۱۸۰، پ) ۱۷۰و ت) ۱۶۴ ..... ۷۹
شکل ۷-۲ تغییرات سرعت گلوله نفوذ کننده بر حسب زمان نفوذ در حل تحلیلی ۸۲
شکل ۷-۳ نمودار تغییرات سرعت گلوله شلیک شده به سازه ساندویچی در حل عددی ۸۴
شکل ۷-۴ میزان تخریب پیش رونده و تغییر فرم مقطع سازه ساندویچی ۸۵
شکل ۷-۵ مقایسه تغییرات سرعت گلوله نفوذ کننده بر حسب زمان نفوذ در حل تحلیلی و حل عددی ۸۷

فهرست علائم و نشانه‌ها

عرض سازه ساندویچی	a
مساحت ناحیه جدایش	A_{deb}
مساحت لایه شدگی	A_{del}
ماتریس سفتی غشایی رویه‌های کامپوزیتی	A_{ij}
ماتریس سفتی غشایی معادل برای رویه‌های کامپوزیتی	$\overline{A}$
ماتریس سفتی کوپلینگ	B_{ij}
سرعت انتشار موج در هسته لانه‌زنبوری	C_d
سرعت موج الاستیک در هسته لانه‌زنبوری	C_e
سرعت موج عرضی در رویه کامپوزیتی	C_f
سرعت موج پلاستیک در هسته لانه‌زنبوری	C_p
ضریب نرخ کرنش در معادله کوپر- سیموندز	D
ماتریس سفتی خمشی	D_{ij}
ماتریس سفتی خمشی معادل	$\overline{D}$
انرژی مربوط به شکست در واحد حجم ماده کامپوزیت	e_t
مدول الاستیسیته متوسط	E_{av}
انرژی مربوط به جدایش	E_{deb}
انرژی مربوط به لایه شدگی	E_{del}
مدول الاستیسته هسته در حالت فشرده شده	E_c
مجموع انرژی‌های تغییر شکل سازه ساندویچی و له‌شدگی لانه‌زنبوری	$E_{c/def}$
انرژی شکست رویه کامپوزیتی	E_{cr}
مدول الاستیسته	E_{ij}
انرژی برش هسته لانه‌زنبوری	E_{sh}
کل انرژی مربوط به شکست ماده کامپوزیت	E_t
نیروی تماسی	$F(t)$
مدول برشی	G_{ij}
نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی مود اول (چقرمگی شکست مود اول)	G_{Ic}
نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی مود دوم (چقرمگی شکست مود دوم)	G_{IIc}

نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی مود سوم (چقرمگی شکست مود سوم)	G_{IIIc}
ضخامت رویه کامپوزیتی	h
ضخامت ناحیه الاستیک	h_e
ضخامت ناحیه پلاستیک	h_p
ارتفاع هسته لانه زنبوری	H
استحکام برشی بین لایه‌ای	ILSS
استحکام کششی بین لایه‌ای	ILTS
چقرمگی شکست	K_c
لاگرانژین	L
اندازه حرکت خطی هسته لانه‌زنبوری	L_c
اندازه حرکت خطی رویه کامپوزیتی	L_f
طول پرتابه	L_p
جرم	m
جرم مؤثر هسته لانه‌زنبوری	m_c
جرم مؤثر رویه کامپوزیتی	m_f
جرم مؤثر سازه ساندویچی	m_s
جرم پلاگ	m_p
جرم پرتابه	M_o
تعداد لایه‌های کامپوزیتی	n_t
ضریب نرخ کرنش در معادله کوپر- سیموندز	P
نیروی بحرانی برش لانه‌زنبوری	P_c
نیروی مورد نیاز برای ایجاد لایه شدگی	P_{del}
تابع مقاومت سراسری سازه ساندویچی	P_g
تابع مقاومت محلی رویه‌ها و هسته	P_l
تنش مچاله‌شدگی لانه‌زنبوری	q
اعضاء ماتریس سفتی تک لایه کامپوزیتی در حالت خارج از محور	$\overline{Q}_{ij}$
شعاع پرتابه	r_p
شعاع ناحیه جدایش	R_{deb}
شعاع لایه شدگی	R_{del}

مساحت سطح	S
مقاومت برشی لایه کامپوزتی	S_{ij}
متغیر زمان	t
انرژی جنبشی	T
انرژی جنبشی هسته	T_c
انرژی جنبشی رویه	T_f
انرژی پتانسیل کرنشی	U
سرعت	V
سرعت اولیه پرتابه	V_o
سرعت پرتابه بعد از ضربه	V_1
سرعت بالستیک	V_b
سرعت ناحیه الاستیک	V_e
سرعت باقی‌مانده	V_r
فرورفتگی محلی	w
فرورفتگی سراسری	W
متغیر دستگاه مختصات مستطیلی	x, y, z
جابجایی	X
تغییر مکان مطلق رویه‌های کامپوزیتی	X_1
تغییر مکان مطلق سازه ساندویچی	X_2
مقاومت فشاری طولی تک لایه کامپوزیتی	X_C
مقاومت کششی طولی تک لایه کامپوزیتی	X_T
مقاومت فشاری عرضی تک لایه کامپوزیتی	Y_C
مقاومت کششی عرضی تک لایه کامپوزیتی	Y_T
فرورفتگی (خیز)	δ
فرورفتگی سراسری	Δ
کرنش	ε
کرنش مچاله شوندگی	ε_D
کرنش راستای x	ε_x
کرنش راستای y	ε_y

کرنش برشی	γ
ضریب پواسون	υ_{ij}
انرژی پتانسیل	Π
چگالی لانه‌زنبوری	ρ_c
چگالی رویه‌های کامپوزیتی	ρ_f
چگالی سازه ساندویچی	ρ_s
تنش	σ
استحکام تسلیم استاتیکی	σ_0
مقاومت فشاری لانه‌زنبوری	σ_D
استحکام تسلیم دینامیکی (تابع نرخ کرنش)	σ_{dyn}
مقاومت برشی هسته لانه‌زنبوری	τ_{cr}
میزان تغییر شکل جانبی محلی (پارامتر مکانی)	ξ
میزان تغییر شکل جانبی سراسری	Ξ
مشتق زمانی	$\frac{d(\ )}{dt}$