دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش طراحی‌کاربردی

پاسخ دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دو انحنایی تحت ضربه کم سرعت با پیش‌تنش اولیه

استاد راهنما:

پروفسور رحمت ا.. قاجار

استاد مشاور:

دکترکرامت ملک زاده

نگارنده:

محسن غلامی

دی ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به پدر فداکار و صبورم

و

مادر دلسوز و مهربانم

که در تمام لحظات سخت زندگی، همیشه حامی و یاورم بوده‌اند

تأییدیه هیأت داوران

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

پاسخ دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دوانحنایی تحت ضربه کم سرعت با پیش‌تنش اولیه

توسط آقای **محسن غلامی** ، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش طراحی کاربردی در تاریخ **۲۷/ ۱۰/**۱۳۹۰ مورد تأیید قرار می‌هند.

۱- استاد راهنما	**جناب آقای پروفسور رحمت الله قاجار**	امضاء
۲- استاد مشاور	**جناب آقای دکترکرامت ملک‌زاده**	امضاء
۳- ممتحن داخلی	**جناب آقای پروفسور سید محمدرضا خلیلی**	امضاء
۴- ممتحن داخلی	**جناب آقای دکتر علی اصغر جعفری**	امضاء
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	**جناب آقای دکتر علی اصغر جعفری**	امضاء

اظهارنامه دانشجو

اینجانب **محسن غلامی** دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **طراحی کاربردی** دانشکده .**مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

پاسخ دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دوانحنایی تحت ضربه کم سرعت با پیش‌تنش اولیه

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **پروفسور رحمت‌الله قاجار** 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 پایان نامه 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 بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد..

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

تشکر و قدردانی

از تمام اساتید عزیزی، که در انجام این پایان‌نامه با نهایت بزرگواری اینجانب را مرهون زحمات بی‌دریغ خود نموده‌اند خالصانه سپاسگزارم، به خصوص از آقای پروفسور رحمت الله قاجار به خاطر راهنمایی‌ها، کمک‌های مفید و ارزشمند علمی و معنوی‌شان و جناب آقای دکتر کرامت ملک‌زاده، به خاطر راهنمایی‌ها و مشاوره‌های ارزنده‌شان که در این پایان‌نامه یاری کردند بسیار متشکرم.

همچنین از تمام دوستانی که در انجام این پایان‌نامه به طریقی اینجانب را یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنم

محسن غلامی

دی ۱۳۹۰

چکیده

امروزه سازه‌های کامپوزیتی به خاطر ویژگی‌هایی چون استحکام، سفتی مخصوص بالا، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، به طور گسترده‌ای در صنایع هوا و فضا، تجهیزات ورزشی، لوله‌های فشار و قسمت‌های مختلف خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل پوسته‌های کامپوزیتی چندلایه تحت بار ضربه در سال‌های اخیر به خاطر حساسیت مواد کامپوزیتی در برابر ضربه خیلی مورد توجه قرار گرفته است. رفتار سازه‌های کامپوزیتی در برابر ضربه‌ی کم سرعت توسط محققان زیادی به صورت تجربی، عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است ولی تحقیقات کمی به بررسی ضربه‌ی کم سرعت روی پوسته‌ها با وجود پیش‌تنش پرداخته شده است. معمولا سازه‌های کامپوزیتی ممکن است در اثر بارهای وارده یا فرآیند ساخت یا مونتاژ تحت پیش‌تنش قرار بگیرند. از جمله این موارد می‌توان به سازه‌های هوایی اشاره کرد که در اثر بارهای وارده تحت پیش‌تنش هستند که در این حالت، ممکن است در معرض برخورد یک جسم مانند پرنده قرار بگیرند. لذا این موضوع اهمیت بررسی پاسخ ضربه روی سازه‌ها با وجود پیش‌تنش را نشان می‌دهد. بنابراین در این پایان‌نامه به تحلیل دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دوانحنایی تحت ضربه‌ی کم سرعت با وجود تنش‌های اولیه به خصوص پیش‌تنش برشی به روش تحلیلی پرداخته می‌شود. همچنین ارتعاشات آزاد و کمانش پوسته بررسی شده است. معادلات حرکت بر اساس تئوری مرتبه برشی اول(FSDT) با استفاده از اصل هامیلتون برای شرایط مرزی ساده استخراج شده‌اند. مولفه‌های جابه‌جایی با توجه به شرایط مرزی به صورت بسط سری فوریه دوگانه نوشته شده است. برای بدست آوردن فرکانس طبیعی و بار کمانش، معادلات حرکت با استفاده از روش توابع وزنی گالرکین حل شده است. تاریخچه‌ی نیروی تماس از دو مدل جرم و فنر بهبودیافته و مدل کامل پیش‌بینی شده است. در مدل جرم و فنر تاریخچه‌ی نیرو از قانون خطی هرتز بدون استفاده از معادلات حرکت بدست آمده و در مدل کامل، معادلات حرکت پوسته و ضربه‌زننده به صورت کوپل و با استفاده از قانون غیرخطی هرتز با نوشتن کد در نرم‌افزار MATLAB به روش تحلیلی حل شده و پاسخ دینامیکی محاسبه شده است.

در انتها، اثر پارامترهای هندسی پوسته مانند تغییرات انحنا، نسبت طول کمان‌ها، نسبت شعاع انحناها، نسبت شعاع انحنا به طول کمان و ضخامت پوسته روی فرکانس طبیعی و کمانش پوسته به خصوص کمانش برشی بررسی و اثرات پیش‌تنش اولیه روی فرکانس طبیعی مطالعه شده است. علاوه بر اثر پارامترهای هندسی پوسته، زاویه‌ی الیاف، اثرات مشخصات هندسی ضربه‌زننده مانند جرم، سرعت، شعاع ضربه‌زننده و همچنین تاثیر پیش‌تنش‌های اولیه به خصوص پیش‌تنش برشی، روی پاسخ ضربه و تاریخچه‌ی نیرو از هر دو مدل جرم و فنر بهبودیافته و کامل بررسی و مقایسه شده‌اند.

فهرست

۱. فصل اول: مقدمه و مروری بر تاریخچه‌ی ضربه پوسته‌های کامپوزیتی..... ۱

۱-۱) مقدمه: ۲

۱-۲) مواد مرکب: ۲

۱-۲-۱) اجزای تشکیل دهنده مواد مرکب: ۳

۱-۳) روش‌های ساخت مواد مرکب لایه‌ای: ۳

۱-۴) مزیت‌های مواد مرکب: ۵

۱-۵) تقسیم بندی مسائل ضربه ۵

۱-۶) مدل‌های ضربه..... ۸

۱-۷) قوانین تماس برای مدلسازی فرورفتگی موضعی بین دو جسم در تماس با هم ۹

۱-۸) مروری بر تحقیقات انجام شده ۹

۱-۹) تحقیق حاضر ۱۶

۱-۹-۱) نوآورهای پروژه..... ۱۶

۱-۹-۲) فرضیات پروژه ۱۷

۱-۹-۳) اهداف پروژه ۱۷

۱-۱۰) ساختار پایان‌نامه ۱۷

۱-۱۱) مراجع: ۱۸

۲. فصل دوم : استخراج معادلات حرکت..... ۲۲

۲-۱) مقدمه..... ۲۳

۲-۲) تئوری پوسته‌ها..... ۲۳

۲-۲-۱) تئوری کلاسیک ۲۴

۲-۲-۲) تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول..... ۲۵

۲-۲-۳) تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالا ۲۶

۲-۳) خواص هندسی پوسته..... ۲۷

۲-۳-۱) روابط Gauss- Godazzi ۲۸
۲-۴) روابط کرنش – جابه‌جایی ۳۲
۲-۵) برآیند تنش‌ها ۳۴
۲-۶) معادلات حرکت ۳۵
۲-۶-۱) محاسبه تغییرات انرژی جنبشی ۳۵
۲-۶-۲) محاسبه تغییرات انرژی کرنشی ۳۶
۲-۶-۳) محاسبه تغییرات انرژی پتانسیل ناشی از نیروهای خارجی ۳۹
۲-۶-۴) محاسبه انرژی لازم جهت جلوگیری از چرخش جسم صلب ۳۹
۲-۶-۵) محاسبه تغییرات انرژی کرنشی ناشی از تنش‌های اولیه ۴۰
۲-۶-۶) روابط تنش - کرنش (بنیانی) پوسته ۴۴
۲-۷) مراجع: ۴۸
۳. فصل سوم: تحلیل ارتعاشات آزاد و کمانش ۵۰
۳-۱) مقدمه ۵۱
۳-۲) تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته ۵۱
۳-۳) تحلیل کمانش پوسته ۵۴
۳-۴) مراجع: ۵۴
۴. فصل چهارم : مدل‌های ضربه ۵۵
۴-۱) مقدمه ۵۶
۴-۲) مدل کامل ۵۶
۴-۳) مدل جرم و فنر بهبود یافته ۵۸
۴-۳-۱) معادلات حرکت مدل جرم و فنر دو درجه آزادی بهبود یافته ۵۹
۴-۳-۲) محاسبه‌ی سفتی معادل پوسته (سفتی استاتیکی) ۶۰
۴-۳-۳) محاسبه‌ی جرم موثر پوسته (m_s^*) ۶۰
۴-۳-۴) قانون تماس خطی چوی ۶۱
۴-۳-۵) محاسبه‌ی ماکزیمم نیرو و سفتی خطی تماسی اصلاح شده ۶۳

۴-۴) مراجع..... ۶۶

۵. فصل پنجم: صحه گذاری و بررسی نتایج..... ۶۷

۵-۱) مقدمه..... ۶۸

۵-۲) صحه‌گذاری نتایج ارتعاشات آزاد ۶۸

۵-۲-۱) ارتعاشات آزاد پوسته کامپوزیتی هذلولی شکل($R1 = -R2$): ۶۸

۵-۲-۲) ارتعاشات آزاد پوسته کامپوزیتی کروی شکل($R1 = R2$): ۶۹

۵-۲-۳) ارتعاشات آزاد پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای شکل($R1 = \infty$):..... ۷۰

۵-۳) بررسی اثر پیش‌تنش کششی، فشاری و برشی روی فرکانس طبیعی ۷۰

۵-۴) بررسی اثر پیش‌تنش فشاری و برشی تا مقدار بحرانی بر روی فرکانس طبیعی بی‌بعد..... ۷۱

۵-۵) صحه‌گذاری نتایج کمانش ۷۲

۵-۵-۱) کمانش تک‌محوره و دو محوره یک صفحه کامپوزیتی: ۷۲

۵-۵-۲) مقایسه نیروی کمانش برشی صفحه مستطیلی همسانگرد (υ=0.3) ۷۳

۵-۶) کمانش محوری پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی($R1 = \infty$):..... ۷۳

۵-۷) کمانش برشی صفحه کامپوزیتی..... ۷۴

۵-۸) کمانش تک‌محوره و دو محوره و برشی پوسته‌ی دو انحنایی:..... ۷۵

۵-۸-۱) اثر نسبت R/a و a/h روی کمانش پوسته‌ی کروی ۷۵

۵-۸-۲) اثر نسبت $R1/R2$ روی کمانش تک‌محوره و دو محوره و برشی بی‌بعد..... ۷۵

۵-۸-۳) اثر نسبت a/b بر کمانش تک‌محوره، دو محوره و برشی بی‌بعد ۷۶

۵-۹) صحه‌گذاری تاریخچه‌ی نیروی ضربه حاصل از مدل جرم و فنر و مدل کامل:..... ۷۶

۵-۹-۱) مثال اول، صفحه‌ی همسانگرد:..... ۷۷

۵-۹-۲) مثال دوم، صفحه‌ی کامپوزیتی:..... ۷۸

۵-۹-۳) مثال سوم، صفحه‌ی کامپوزیتی: ۷۹

۵-۹-۴) مثال چهارم، صفحه کامپوزیتی با جرم ضربه‌زننده کوچک: ۸۱

۵-۹-۵) مثال پنجم، پنل استوانه‌ای کامپوزیتی با جرم ضربه‌زننده کوچک:..... ۸۲

۵-۹-۶) صفحه‌ی کامپوزیتی با پیش‌تنش اولیه با جرم ضربه‌زننده کوچک:..... ۸۳

۵-۱۰) مثال‌هائی برای پوسته کامپوزیتی دو انحنایی: ۸۴
۵-۱۰-۱) کامپوزیت متعامد(بدون پیش تنش):..... ۸۴
۵-۱۰-۲) کامپوزیت زاویه دار(بدون پیش تنش):..... ۸۵
۵-۱۰-۳) اثرنسبت شعاع انحنا به طول کمان (R/a) روی پاسخ دینامیکی: ۸۶
۵-۱۰-۴) اثر نسبت (a/b) روی پاسخ دینامیکی: ۸۸
۵-۱۰-۵) اثر نسبت شعاع دو انحنا $(R2/R1)$ روی پاسخ دینامیکی: ۹۲
۵-۱۰-۶) اثر نسبت شعاع ضربه زننده به شاع پوسته (RI/RS) روی پاسخ دینامیکی:..... ۹۴
۵-۱۰-۷) اثر نسبت ضخامت پوسته به شعاع پوسته (h/R) روی پاسخ دینامیکی:..... ۹۶
۵-۱۰-۸) اثر زاویه الیاف روی پاسخ دینامیکی: ۹۹
۵-۱۰-۹) اثر جرم ضربه‌زننده روی پاسخ دینامیکی: ۱۰۱
۵-۱۰-۱۰) اثر سرعت جسم ضربه‌زننده روی پاسخ دینامیکی: ۱۰۴
۵-۱۰-۱۱) اثر سرعت و جرم ضربه‌زننده در یک سطح انرژی روی پاسخ دینامیکی: ۱۰۶
۵-۱۰-۱۲) بررسی اثر پیش تنش کششی و فشاری و برشی روی پاسخ دینامیکی: ۱۰۸
۵-۱۰-۱۳) اثر پیش تنش فشاری تا حوالی بار بحرانی پوسته روی پاسخ دینامیکی:..... ۱۱۰
۵-۱۰-۱۴) اثر پیش‌تنش برشی تا حوالی بار بحرانی پوسته روی پاسخ دینامیکی: ۱۱۳
۵-۱۰-۱۵) برخورد ضربه‌زننده به صورت غیر مرکزی: ۱۱۷
۵-۱۱) مراجع: ۱۱۸
۶. فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....۱۲۰
۶-۱) نتیجه گیری:..... ۱۲۱
۶-۲) پیشنهادات برای کارهای آتی: ۱۲۳
۷. پیوست‌ها.....۱۲۵
۷-۱) پیوست الف-۱ : ۱۲۶
۷-۲) پیوست الف-۲ : ۱۲۷
۷-۳) پیوست الف-۳: ۱۲۹

جداول

جدول(۵-۱): مشخصات پوسته کامپوزیتی[۱]: ۶۸
جدول(۵-۲): فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد پوسته کامپوزیتی متعامد هذلولی شکل برای تئوری تغییر شکل برشی پوسته کم عمق (SDSST) و تئوری کلاسیک پوسته کم عمق (CSST) برای نسبت های مختلف a/h و R/a (a/b=1): ۶۹
جدول(۵-۳): مشخصات پوسته کامپوزیتی کروی[۲]: ۶۹
جدول(۵-۴):فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد پوسته کامپوزیتی متعامدکروی شکل برای نسبت‌های مختلف ضخامت (a/b=1) ۶۹
جدول(۵-۵):فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد پوسته کامپوزیتی متعامد استوانه‌ای شکل(a/b=1) برای نسبت‌های مختلف h/a و R/a ۷۰
جدول(۵-۶): هندسه و جنس پوسته دو انحنایی(کروی): ۷۰
جدول(۵-۷): اثر پیش‌تنش کششی، فشاری و برشی بر فرکانس طبیعی بی‌بعد ۷۱
جدول(۵-۸): مشخصات صفحه‌کامپوزیتی: ۷۲
جدول(۵-۹): نیروی بحرانی تک‌محوره و دو محوره بی بعد صفحه‌کامپوزیتی متعامد (a/b=1) ۷۲
جدول(۵-۱۰): نیروی بحرانی تک محوره و دو محوره بی‌بعد صفحه‌کامپوزیتی زاویه‌دار(SS2) (a/b=1) ۷۲
جدول(۵-۱۱): مقایسه نیروی کمانش برشی بی‌بعد صفحه مستطیلی همسانگرد (υ=0.3)..... ۷۳
جدول(۵-۱۲): نیروی بحرانی محوری بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای شکل کامپوزیتی متعامد ۷۳
جدول(۵-۱۳): هندسه و جنس صفحه کامپوزیتی:..... ۷۴
جدول(۵-۱۴): نیروی کمانش برشی بی‌بعد صفحه‌کامپوزیتی متعامد: ۷۴
جدول(۵-۱۵): نیروی کمانش تک‌محوره و دو محوره و برشی بی‌بعد پوسته کامپوزیتی کروی متعامد (a/b=1)۷۵
جدول(۵-۱۶): هندسه و جنس صفحه همسانگرد و ضربه زننده فولادی [۹]:..... ۷۷
جدول(۵-۱۷): هندسه و جنس صفحه کامپوزیتی و ضربه‌زننده فولادی مثال دوم [۱۱] : ۷۸
جدول(۵-۱۸): هندسه و جنس صفحه کامپوزیتی و ضربه‌زننده فولادی مثال سوم [۱۴]: ۷۹
جدول(۵-۱۹): مشخصات هندسه و جنس صفحه کامپوزیتی و ضربه‌زننده فولادی مثال چهارم [۱۵]: ۸۱
جدول(۵-۲۰): هندسه و جنس پنل استوانه‌ای و ضربه‌زننده فولادی[۱۷]:..... ۸۲
جدول(۵-۲۱): هندسه و جنس پوسته کروی کامپوزیتی و ضربه‌زننده فولادی:..... ۸۴
جدول(۵-۲۲): اثر نسبت R/a بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته..... ۸۷
جدول(۵-۲۳): اثر نسبت $R2/R1$ بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر..... ۹۴

جدول(۵-۲۴): اثر Ri/RS بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته ۹۶
جدول(۵-۲۵): اثر h/R بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته ۹۹
جدول(۵-۲۶): اثر پیش‌تنش بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته ۱۱۰
جدول(۵-۲۷): اثر پیش‌تنش فشاری بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته ۱۱۳
جدول(۵-۲۸): اثر پیش‌تنش برشی بر ماکزیمم نیروی تماس، خیز و مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته ۱۱۷

شکل‌ها

شکل(۱-۱): دسته‌بندی پاسخ ضربه از نظر مدت زمان [۱]..... ۷
شکل(۱-۲): مقایسه بین ضربه با جرم کوچک (شکل الف) و ضربه با جرم بزرگ (شکل ب)..... ۷
شکل(۲-۱): تغییر شکل صفحه عمود بر سطح میانی در تئوری کلاسیک ۲۵
شکل(۲-۲): تغییر شکل صفحه عمود بر سطح میانی در تئوری مرتبه اول برشی ۲۶
شکل(۲-۳): شماتیک دوران مقطع پوسته در تئوری مرتبه سوم..... ۲۷
شکل(۲-۴): مختصات یک پوسته دوانحنایی چندلایه ۲۸
شکل(۲-۵): موقعیت بردار نقاط بر روی صفحه میانی و بالای صفحه ۲۸
شکل(۲-۶): المان جزئی پوسته ۳۰
شکل(۲-۷): جزء سطح روی سطح میانی یک پوسته‌ی دو انحنایی..... ۳۱
شکل(۲-۸): جزء سطح به فاصله ξ از صفحه میانی پوسته دو انحنایی ۳۱
شکل(۲-۹): برآیند تنش‌ها بر روی یک المان پوسته ۳۴
شکل(۴-۱): ضربه‌ی عرضی بر سطح خارجی پوسته ۵۷
شکل(۴-۲): الف - مدل جرم و فنر دو درجه آزادی غیرخطی شیواکومار و همکاران ب- مدل جرم و فنر دو درجه آزادی خطی بهبود یافته (مورد استفاده در این پروژه) ۵۸
شکل(۴-۳): الف- تاریخچه‌ی نیروی تماس. ب- منحنی‌های نیروی تماس بر حسب فرورفتگی برای مقادیر مختلف K و n [۷]..... ۶۲
شکل(۴-۴): رابطه‌ی خطی نیروی تماس بر حسب فرورفتگی بر اساس قانون تماس خطی چوی [۷] ۶۲
شکل(۴-۵): مدل المان محدود برای تحلیل ارتعاش سیستم با جرم متمرکز ۶۳
شکل(۴-۶): الگوریتم فرایند تعیین تاریخچه‌ی نیرو در مدل جرم و فنر بهبود یافته ۶۵
شکل(۵-۱): اثر پیش‌تنش فشاری و برشی تا مقدار بحرانی بر روی فرکانس طبیعی بی‌بعد $\Omega = (\omega a2\rho E2)/h$ ۷۱
شکل(۵-۲): همگرایی نیروی کمانش برشی بی‌بعد صفحه کامپوزیتی متعامد..... ۷۴
شکل(۵-۳): اثر نسبت $R1/R2$ بر بار کمانش تک‌محوره، دو محوره و برشی کامپوزیت متعامد..... ۷۶
شکل(۵-۴): اثر نسبت a/b بر بار کمانش بی‌بعد تک‌محوره، دو محوره و برشی کامپوزیتی متعامد..... ۷۶
شکل(۵-۵): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل‌های جرم و فنر گانگ، وو و چانگ، کاراس، جرم و فنر بهبود یافته و کامل پیشنهادی برای یک ورق همسانگرد..... ۷۷
شکل(۵-۶): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل جرم و فنر خطی چوی به کمک نرم افزار (FEM) و مدل جرم و فنر بهبود یافته حاضر..... ۷۸

شکل(۵-۷): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل ازنتایج تجربی دلفوز، مدل معکوس چیریستوفورو، مدل تحلیلی پیرسن، مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته پیشنهادی ۷۹
شکل(۵-۸): همگرایی نیروی تماسی بر حسب زمان (مد کامل) ۸۰
شکل(۵-۹): همگرایی خیز محل ضربه بر حسب زمان (مدل کامل) ۸۰
شکل(۵-۱۰): مقایسه نمودارخیز بر حسب زمان بین دو مدل کامل و جرم وفنر بهبود یافته ۸۱
شکل(۵-۱۱): همگرایی نیروی تماسی بر حسب زمان (مدل کامل) برای جرم ضربهزننده کوچک ۸۱
شکل(۵-۱۲): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از حل تحلیلی چیریستوفورو و حل (FEM) سان و چن و حل تحلیلی پیرسن و مدل کامل و مدل جرم و فنر ۸۲
شکل(۵-۱۳): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از کریش نامورثی و ماهاجان به روش المان محدود و مدل کامل ۸۳
شکل(۵-۱۴): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از حل (FEM) سان و چن و مدل کامل پیشنهادی ۸۳
شکل(۵-۱۵): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته برای کامپوزیت متعامد ۸۴
شکل(۵-۱۶): مقایسه تاریخچه خیز محل ضربه حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته برای کامپوزیت متعامد..... ۸۵
شکل(۵-۱۷): مقایسه تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته برای کامپوزیت زاویه‌دار ۸۵
شکل(۵-۱۸): مقایسه تاریخچه خیز محل ضربه حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته برای کامپوزیت زاویه‌دار ۸۶
شکل(۵-۱۹): اثر نسبت (R/a) بر روی تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۸۶
شکل(۵-۲۰): اثر نسبت (R/a) بر روی تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل کامل ۸۷
شکل(۵-۲۱): اثر نسبت (R/a) بر روی تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۸۷
شکل(۵-۲۲): اثر نسبت (R/a) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل ۸۸
شکل(۵-۲۳): نسبت (R/a) بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل..... ۸۸
شکل(۵-۲۴): اثر نسبت (a/b) بر تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۸۹
شکل(۵-۲۵): اثر نسبت (a/b) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۸۹
شکل(۵-۲۶): اثر نسبت (a/b) بر تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل کامل ۹۰
شکل(۵-۲۷): اثر نسبت (a/b) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۰
شکل(۵-۲۸): اثر نسبت (a/b) بر خیز بیبعد (w/h) بر حسب x/a حاصل از مدل کامل ۹۰
شکل(۵-۲۹): مقایسه بیشینه‌ی نیروی تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۱

شکل(۵-۳۰): مقایسه بیشینه‌ی خیز محل ضربه حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۱
شکل(۵-۳۱): مقایسه مدت زمان تماس حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۱
شکل(۵-۳۲): اثر نسبت $(R2/R1)$ بر تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۲
شکل(۵-۳۳): اثر نسبت $(R2/R1)$ بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۲
شکل(۵-۳۴): اثر نسبت $(R2/R1)$ بر تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل کامل ۹۳
شکل(۵-۳۵): اثر نسبت $(R2/R1)$ بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل ۹۳
شکل(۵-۳۶): اثر نسبت$(R2/R1)$ بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل ۹۴
شکل(۵-۳۷): اثر نسبت (Ri/RS) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۴
شکل(۵-۳۸): اثر نسبت (Ri/RS) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل ۹۵
شکل(۵-۳۹): اثر نسبت (Ri/RS) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۵
شکل(۵-۴۰): اثر نسبت (Ri/RS) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل ۹۶
شکل(۵-۴۱): اثر نسبت(Ri/RS) بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل ۹۶
شکل(۵-۴۲): اثر نسبت (h/R) بر تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۷
شکل(۵-۴۳): اثر نسبت (h/R) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۹۷
شکل(۵-۴۴): اثر نسبت (h/R) بر تاریخچه نیروی تماسی حاصل از کامل ۹۸
شکل(۵-۴۵): اثر نسبت (h/R) بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل ۹۸
شکل(۵-۴۶): اثر نسبت (h/R) بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل ۹۸
شکل(۵-۴۷): اثر زوایه الیاف بر روی تاریخچه‌ی نیروی تماس حاصل از مدل جرم وفنر ۹۹
شکل(۵-۴۸): اثر زوایه الیاف بر روی تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل جرم وفنر ۱۰۰
شکل(۵-۴۹): اثر زوایه الیاف بر روی تاریخچه‌ی نیروی تماس حاصل از مدل کامل ۱۰۰
شکل(۵-۵۰): اثر زوایه الیاف بر تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل کامل ۱۰۰
شکل(۵-۵۱): اثر زاویه‌ی الیاف بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل ۱۰۱
شکل(۵-۵۲): مقایسه ماکزیمم نیرو برای زوایای مختلف الیاف حاصل از مدل کامل و جرم وفنر بهبود یافته ۱۰۱
شکل(۵-۵۳): مقایسه ماکزیمم خیز محل ضربه برای زوایای مختلف الیاف حاصل از مدل کامل و جرم وفنر بهبود یافته ۱۰۱
شکل(۵-۵۴): اثر جرم ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی نیرو تماسی حاصل از مدل جرم و فنر ۱۰۲
شکل(۵-۵۵): اثر جرم ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل جرم و فنر ۱۰۲
شکل(۵-۵۶): اثر جرم ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی نیرو تماسی حاصل از مدل کامل ۱۰۲
شکل(۵-۵۷): اثر جرم ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل کامل ۱۰۳
شکل(۵-۵۸): اثر جرم ضربه‌زننده بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل ۱۰۳

شکل(۵-۵۹): اثر سرعت ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی نیروی تماسی حاصل از مدل جرم و فنر ۱۰۴
شکل(۵-۶۰): اثر سرعت ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل جرم و فنر..... ۱۰۴
شکل(۵-۶۱): اثر سرعت ضربه‌زننده بر تاریخچه‌ی نیرو تماسی حاصل از مدل کامل..... ۱۰۵
شکل(۵-۶۲): اثر سرعت ضربه زننده بر تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل کامل..... ۱۰۵
شکل(۵-۶۳): اثر سرعت ضربه‌زننده بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل..... ۱۰۵
شکل(۵-۶۴): اثر سرعت و جرم ضربه‌زننده در یک سطح انرژی بر تاریخچه‌ی نیرو تماسی حاصل از مدل جرم وفنر ۱۰۶
شکل(۵-۶۵): اثر سرعت و جرم ضربه‌زننده در یک سطح انرژی بر تاریخچه‌ی نیرو تماسی حاصل از مدل کامل ۱۰۶
شکل(۵-۶۶): اثر سرعت و جرم ضربه‌زننده در یک سطح انرژی بر روی تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل جرم و فنر ۱۰۷
شکل(۵-۶۷): اثر سرعت و جرم ضربه‌زننده در یک سطح انرژی بر روی تاریخچه‌ی خیز حاصل از مدل کامل۱۰۷
شکل(۵-۶۸): اثر سرعت و جرم ضربه‌زننده در یک سطح انرژی بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل ۱۰۸
شکل(۵-۶۹): اثر پیش‌تنش بر تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته..... ۱۰۸
شکل(۵-۷۰): اثر پیش‌تنش بر تاریخچه خیز محل ضربه حاصل از مدل جرم و فنر بهبودیافته ۱۰۹
شکل(۵-۷۱): اثر پیش‌تنش بر تاریخچه نیروی تماسی حاصل از مدل کامل..... ۱۰۹
شکل(۵-۷۲): اثر پیش‌تنش بر تاریخچه خیز محل ضربه حاصل از مدل کامل..... ۱۱۰
شکل(۵-۷۳): اثر پیش‌تنش فشاری تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۱۱۱
شکل(۵-۷۴): اثر پیش‌تنش فشاری تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۱۱۱
شکل(۵-۷۵): اثر پیش‌تنش فشاری تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل کامل ۱۱۱
شکل(۵-۷۶): اثر پیش‌تنش فشاری تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل..... ۱۱۲
شکل(۵-۷۷): اثر پیش‌تنش فشاری تا نزدیک بار بحرانی بروی خیز در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل..... ۱۱۲
شکل(۵-۷۸): تغییر شکل پوسته در حالت اعمال پیش تنش فشاری به مقدار ۰/۹ بار بحرانی فشاری..... ۱۱۲
شکل(۵-۷۹): اثر پیش تنش برشی تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۱۱۳
شکل(۵-۸۰): اثر پیش‌تنش برشی تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه خیز حاصل از مدل جرم و فنر بهبود یافته ۱۱۴

شکل(۵-۸۱): اثر پیش‌تنش برشی تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه نیروی تماس حاصل از مدل کامل..... ۱۱۴
شکل(۵-۸۲): اثر پیش‌تنش برشی تا نزدیک بار بحرانی بر تاریخچه خیز حاصل از مدل کامل ۱۱۴
شکل(۵-۸۳): اثر پیش‌تنش برشی تا نزدیک بار بحرانی بر خیز پوسته در راستای $x1$ حاصل از مدل کامل. ۱۱۵
شکل(۵-۸۴): تغییر شکل پوسته در حالت بدون پیش تنش ۱۱۶
شکل(۵-۸۵): تغییر شکل پوسته در حالت اعمال پیش تنش به مقدار ۹/ ۰بار بحرانی برشی ۱۱۶
شکل(۵-۸۶): (الف) کانتور خیز پوسته در حالت اعمال پیشتنش فشاری به مقدار ۹/ ۰بار بحرانی فشاری - (ب) کانتور خیز در حالت اعمال پیشتنش برشی به مقدار ۹/ ۰بار بحرانی برشی.....۱۱۶
شکل(۵-۸۷): مقایسه نیروی ضربه حاصل از مدل کامل و مدل جرم وفنر بهبودیافته در ضربه غیر مرکزی.. ۱۱۷
شکل(۵-۸۸): مقایسه خیز محل ضربه حاصل از مدل کامل و مدل جرم و فنر بهبودیافته در ضربه غیر مرکزی ۱۱۷
شکل(۵-۸۹): خیز محل ضربه در راستای $x1$ بدست آمده از مدل کامل..... ۱۱۸
شکل(۵-۹۰): تغییر شکل پوسته در حالت ضربه غیر مرکزی ۱۱۸

فهرست علائم و اختصارات

طول کمان‌های صفحه‌ی میانی..... a, b

ضخامت پوسته..... h

شعاع‌های اصلی انحناء صفحه‌ی میانی..... R_1, R_2

محورهای مختصات منحنی الخط متعامد..... ξ_1, ξ_2, ξ

تغییر مکان‌های سطح میانی به ترتیب در راستای محورهای ξ_1 و ξ_2 و ξ..... U_0, V_0, W_0

چرخش عمودهای عرضی به ترتیب حول محور ξ_2 و ξ_1..... ϕ_1, ϕ_2

مولفه کرنش‌های عمودی و برشی صفحه‌ای..... $\varepsilon_{11}^0, \varepsilon_{22}^0, \varepsilon_{12}^0, \varepsilon_{21}^0$

مولفه کرنش‌های برشی عرضی صفحه میانی ..... $\varepsilon_{13}^0, \varepsilon_{23}^0$

انحناهای صفحه‌ی میانی..... $k_1, k_{21}, k_{12}, k_{21}$

برآیند نیروهای عمودی و برشی صفحه‌ای بر واحد طول..... $N_{11}, N_{22}, N_{12}, N_{21}$

برآیند گشتاورهای خمشی و برشی بر واحد طول..... $M_{11}, M_{22}, M_{12}, M_{21}$

برآیند نیروهای برشی عرضی بر واحد طول..... Q_{13}, Q_{23}

ضریب تصحیح برشی..... K_S

انرژی جنبشی، کرنشی و انرژی پتانسیل ناشی از نیروهای خارجی..... K, U, W_{ext}

سطح و مرز صفحه‌ی میانی پوسته..... Ω, Γ

تنش‌های عمودی و برش صفحه‌ای..... $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}, \sigma_{21}$

تنش‌های برش عرضی..... σ_{13}, σ_{23}

نیروی عرضی وارد بر سطح پوسته..... q

نیروهای لبه‌ای وارد بر مرز پوسته..... $\hat{N}_{11}, \hat{N}_{22}, \hat{N}_{12}, \hat{N}_{21}, \hat{Q}_{13}, \hat{Q}_{23}$

گشتاورهای لبه‌ای وارد بر مرز پوسته..... $\hat{M}_{11}, \hat{M}_{22}, \hat{M}_{12}, \hat{M}_{21}$