دانشکده مهندسی عمران

بررسی آزمایشگاهی و عددی ورق فولادی کمانش ناپذیر، غلاف شده با پروفیل ناودانی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش سازه

نام دانشجو:

احسان خواهان بیدختی

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی کافی

استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

اسفندماه ۱۳۹۲

دانشکده مهندسی عمران

بررسی آزمایشگاهی و عددی ورق فولادی کمانش ناپذیر، غلاف شده با پروفیل ناودانی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش سازه

نام دانشجو:

احسان خواهان بیدختی

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی کافی

استاد مشاور:

مهندس سیف‌الله همتی

اسفندماه ۱۳۹۲

دانشکده مهندسی عمران

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان‌نامه‌ی آقای احسان خواهان بیدختی برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – گرایش سازه تحت عنوان"بررسی آزمایشگاهی و عددی ورق فولادی کمانش ناپذیر، غلاف شده با پروفیل ناودانی" در جلسه مورخ ۱۲/ ۱۲ / ۹۲ بررسی و با نمره

عدد	
حروف	

مورد تایید قرار گرفت.

اعضای هیئت داوران:

استاد راهنمای: **دکتر کافی** امضاء:

استاد مشاور: **مهندس همتی** امضاء:

استاد داور: **دکتر خیرالدین** امضاء:

استاد داور: **دکتر گرامی** امضاء:

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده: ..... امضاء .....

دانشکده مهندسی عمران

اینجانب احسان خواهان بیدختی متعهد می‌شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان **" بررسی آزمایشگاهی و عددی ورق فولادی کمانش ناپذیر، غلاف شده با پروفیل ناودانی "** که به عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه به دانشگاه ارائه شده است، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت های علمی اینجانب می‌باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق معنوی متعلق به این پایان‌نامه از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مترتب به آن نیز از طرف مراجع قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی: احسان خواهان بیدختی

شماره دانشجویی: ۹۰۱۱۱۴۹۰۱۳

امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان با ذکر مرجع بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما با ذکر مرجع بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما: دکتر محمدعلی کافی

تاریخ:

امضاء:

این پایان‌نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به:

*محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.

* به استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

* به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.

*به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.

* الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته‌ی آنان جامه‌ی عمل بپوشانم.

* پروردگارا حسن عاقبت ، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

* خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

تشکر و قدردانی:

پس از سپاس و ثنای بی‌حد بر آستان صفات بی‌همتای احدیت که در کمال رافت و در نهایت عطوفت رخصت اتمام این پایان‌نامه را به بنده عطا فرموده است، لازم است از کلیه اساتیدی که در تمامی دوران تحصیلی ، شوق آموختن، شور زندگی، درک هستی، تدبیر کار و بالاخره سپیدی کمال را به من آموختند سپاسگذاری نمایم و با تقدیر و تشکر فراوان از استاد فرهیخته و فرزانه **جناب آقای دکتر کافی** که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه‌گشای اینجانب در اتمام این پایان‌نامه بوده است. همچنین بر خود واجب می‌دانم از زحمات کلیه دوستان و کارکنان آزمایشگاه سازه و مکانیک دانشگاه سمنان، بلاخص جناب آقای مهندس بخشایی ، کارشناس محترم آزمایشگاه سازه ، که در تمامی مراحل انجام پایان‌نامه یاری‌گر اینجانب بوده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان، این پایان‌نامه را که حاصل ماهها تلاش و کوشش مستمر بنده و زحمات بی‌دریغ استاد گرانقدر جناب آقای دکتر کافی بوده است را به هموطنان عزیز کشورمان که لایق بهترین‌ها می‌باشند ، تقدیم می‌نمایم.

چکیده

سیستم مهاربندی هم‌محور یکی از سیستم‌های کلاسیک مقاوم در برابر زلزله بوده که اغلب در قاب‌های با اتصالات مفصلی استفاده می‌شود. سهولت اجرا، امکان بازسازی، و تعمیر آسان و صرفه اقتصادی آن‌ها نسبت به سازه‌های خمشی باعث شده تا همواره طراحان را به استفاده از این سیستم هدایت کند. با این وجود از مهم‌ترین معایب این نوع مهاربندها می‌توان به ضعف کمانش عضو فشاری و شکل‌پذیری پایین آن اشاره نمود. به همین منظور در سه دهه گذشته تحقیقاتی به منظور افزایش شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور صورت گرفته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به گونه‌ی جدیدی از مهاربندها، تحت عنوان مهاربندهای کمانش ناپذیر[1] اشاره نمود. مهاربندهای کمانش ناپذیر نوعی سیستم جدید مقاوم لرزه‌ای بوده که به دلیل کارایی و همچنین عملکرد لرزه‌ای بهتر از مهاربندهای مرسوم[2]، استفاده از آن‌ها در قاب‌های مهاربندی شده همگرا در حال گسترش است.

هدف این تحقیقات بررسی آزمایشگاهی و عددی در مورد عضو کمانش ناپذیری بوده است که قابلیت نصب در انتهای مهاربندهای هم‌محور را داراست. این عضو کمانش ناپذیر از یک تسمه فولادی محاط شده در پروفیل ناودانی با درپوشی از جنس چوب و یا فلز ساخته شده است که در آن پروفیل ناودانی و درپوش آن، نقش غلاف را برای کمانش ناپذیر ساختن ورق فولادی ایفا می‌نمایند. عملکرد ورق فولادی محاط شده به عنوان هسته‌ی عضو کمانش ناپذیر موجب شده است که در اثر نیروی محوری مهاربند، ورق فولادی بدون متحمل شدن کمانش، تسلیم شده و با عملکرد غیرخطی خود باعث جذب انرژی گردد. از طرفی دیگر، وجود عضو مورد نظر در انتهای مهاربندها، باعث خلاصه شدن خرابی‌های سازه‌ای به این بخش از سازه شده در حالیکه دیگر عناصر سازه در ناحیه خطی خود، عمل خواهند نمود.

در پایان یادآور شده که تعداد آزمایشات انجام شده در این تحقیق، مجموعا ۶ آزمایش بوده است که نتایج آن‌ها نشان داده است که پروفیل ناودانی عضوی مناسبی برای غلاف پوششی بوده و درپوش آن به عنوان پارامتری تاثیرگذاری در عملکرد مطلوب سیستم مربوطه به حساب خواهد آمد.

واژه‌های کلیدی:

مهاربند هم‌محور، شکل‌پذیری، فیوز کنترل کمانش ،بارگذاری چرخه‌ای، مهاربندهای کمانش ناپذیر

[1] Buckling Restrained Brace Frame(BRBF)

[2] Conventional Braced Frame

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- بیان مسئله تحقیق ۳

۱-۲- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۳- نوآوری تحقیق ۵

۱-۴- اهداف تحقیق ۵

۱-۵- فرضیات تحقیق ۶

۱-۶- روش‌شناسی تحقیق ۷

۱-۷- ساختار فصول پایان‌نامه ۸

فصل ۲: مروری بر منابع ۹

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- انواع قاب‌های مهاربندی ۱۲

۲-۳- مهاربندهای کمانش ناپذیر ۱۵

۲-۴- کلیاتی از مهاربندهای کمانش ناپذیر ۱۹

۲-۴-۲- معایب و مزایای مهاربندهای کمانش ناپذیر ۲۳

۲-۴-۳- انواع مهاربندهای BRB ۲۴

۲-۴-۴- اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مهاربندهای کمانش ناپذیر ۲۶

۲-۴-۵- اثرات متفاوت مواد نچسب ۳۲

۲-۴-۶- مفهوم طراحی مهاربندهای BRB ۳۶

۲-۵- مفهوم خواص مکانیکی مهاربند BRB ۳۷

۲-۶- بررسی نقش نگهدارنده در مهاربندهای BRB ۴۵

۲-۶-۱- خستگی ۴۵

۲-۶-۲- آزمایش خستگی ۴۶

۲-۶-۳- بررسی عملکرد نگهدارنده‌ها توسط آزمایش خستگی با چرخه‌ی پایین ۴۸

۲-۷- مهاربندهای کمانش ناپذیر تماما فولادی ۵۵

۲-۷-۱- معیار کنترل کمانش کلی مهاربندهای BRB تماما فولادی ۵۶

۲-۷-۲- مطالعه اجزای محدود مهاربندهای تماما فولادی ۵۸

۲-۸- استفاده از مهاربندهای BRB با طول کاهش یافته ۶۳

۲-۸-۱- معرفی مهاربند BRB با طول کاهش یافته ۶۳

۲-۸-۲- موقعیت قرارگیری هسته در مهاربندهای RLBRB ۶۵

۲-۸-۳- عملکرد خستگی با چرخه‌ی پایین در مهاربندهای RLBRB ۶۶
۲-۸-۴- ظرفیت استهلاک انرژی ۶۷
۲-۸-۵- مقررات طراحی مهاربندهای RLBRB ۶۸
۲-۹- نتیجه‌گیری ۶۸

فصل ۳: مطالعات آزمایشگاهی **۷۰**

۳-۱- مقدمه ۷۱
۳-۲- معرفی Set-up آزمایش و نحوه طراحی آن ۷۲
۳-۳- نصب و آماده‌سازی نمونه‌ها ۷۴
۳-۳-۱- پیچ‌های مورد استفاده در آزمایش ۷۴
۳-۳-۲- کرنش‌سنج‌ها ۷۶
۳-۳-۳- نصب تغییرمکان‌سنج‌ها ۷۹
۳-۴- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی ۸۰
۳-۵- شرح آزمایش نمونه‌ی اول(T) ۸۲
۳-۵-۲- نمودار تنش-کرنش آزمایش نمونه‌ی اول(T) ۸۴
۳-۵-۳- نتایج عددی آزمایش نمونه‌ی اول(T) ۸۴
۳-۶- شرح آزمایش نمونه‌ی دوم(TU) ۸۵
۳-۶-۲- نمودارهای آزمایش نمونه‌ی دوم(TU) ۸۷
۳-۶-۳- نتایج عددی آزمایش نمونه‌ی دوم(TU) ۸۸
۳-۷- شرح آزمایش نمونه‌ی سوم(TUSW) ۹۱
۳-۷-۲- نمودارهای آزمایش نمونه‌ی سوم(TUSW) ۹۵
۳-۷-۳- نتایج عددی آزمایش نمونه‌ی سوم(TUSW) ۹۶
۳-۸- شرح آزمایش نمونه‌ی چهارم(TUSM) ۱۰۰
۳-۸-۲- نمودارهای آزمایش نمونه‌ی چهارم(TUSM) ۱۰۲
۳-۸-۳- محاسبات عددی آزمایش نمونه‌ی چهارم(TUSM) ۱۰۳
۳-۹- شرح آزمایش نمونه‌ی پنجم(TUSS) ۱۰۷
۳-۹-۲- نمودارهای آزمایش نمونه‌ی پنجم(TUSS) ۱۰۹
۳-۹-۳- محاسبت عددی آزمایش نمونه‌ی پنجم(TUSS) ۱۱۰
۳-۱۰- شرح آزمایش نمونه‌ی ششم(TUSSWO) ۱۱۴
۳-۱۰-۲- نمودارهای آزمایش نمونه‌ی ششم(TUSSWO) ۱۱۵
۳-۱۰-۳- محاسبات عددی آزمایش نمونه‌ی ششم(TUSSWO) ۱۱۶
۳-۱۱- مقایسه رفتار نمونه‌های سپری شکل فولادی ۱۲۰

فصل ٤: مطالعات عددی و کالیبراسیون ۱۲۵

۴-۱- مقدمه ۱۲۶
۴-۲- موقعیت قرارگیری المان سپری در قاب مهاربندی شده ۱۲۷
۴-۳- محیط گرافیکی آباکوس ۱۳۰
۴-۴- المان مورد استفاده در آباکوس ۱۳۲
۴-۵- معرفی المان مستهلک‌کننده انرژی ۱۳۳
۴-۶- مش‌بندی مدل ۱۳۴
۴-۷- بارگذاری چرخه‌ای ۱۳۵
۴-۸- داده‌های خواص مصالح ۱۳۷
۴-۹- مدل‌سازی تحلیلی اولیه ۱۳۷
۴-۱۰- تحلیل مدل تحلیلی اولیه ۱۳۸
۴-۱۱- بررسی نتایج اولیه ۱۳۹
۴-۱۱-۱- بررسی و تحلیل نتایج تحلیل اولیه‌ی نمونه(تحلیل مقدماتی) ۱۴۰
۴-۱۱-۲- نتایج عددی اجزاء محدود مدل شماره ۱ (تحلیل مقدماتی) ۱۴۳
۴-۱۲- مدل‌سازی تحلیل نهایی ۱۴۵
۴-۱۳- اعتبارسنجی نمونه‌ی تحلیلی نهایی و آزمایشگاهی ۱۴۷
۴-۱۴- مدل اجزای محدود ۲ (تحلیل نهایی) ۱۴۷
۴-۱۴-۲- بررسی و تحلیل نتایج تحلیل ثانویه‌ی نمونه(تحلیل نهایی) ۱۴۸
۴-۱۴-۳- نتایج عددی اجزاء محدود مدل شماره ۲ (تحلیل نهایی) ۱۵۱
۴-۱۵- جمع‌بندی و مقایسه رفتاری نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی ۱۵۴

فصل ٥: جمع‌بندی و پیشنهادها ۱۵۵

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۵۶
۵-۲- پیشنهادات ۱۵۸

فصل ٦: مراجع ۱۵۹

فهرست اشکال

شکل (۲-۱) طرحی از مهاربندهای هم‌محور فولادی بر اساس مقررات طرح لرزه‌ای آیین‌نامه سازه‌های فولادی آمریکا..... ۱۲
شکل (۲-۲) آرایش انواع مهاربندهای هم‌محور..... ۱۳
شکل (۲-۳) نمونه‌ای از مهاربند X..... ۱۴
شکل (۲-۴) نمونه‌ای از مهاربندهای برون‌محور و اختصاص بخشی از تیر، به عنوان تیر پیوند..... ۱۵
شکل (۲-۵) مکانیزم تسلیم در مهاربندهای برون‌محور..... ۱۵
شکل (۲-۶) تفاوت رفتار مهاربندهای کمانش ناپذیر با مهاربندهای معمولی در کشش و فشار..... ۱۷
شکل (۲-۷) استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر در سازه‌های جدید..... ۱۷
شکل (۲-۸) استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر جهت بازسازی سازه‌های بتنی..... ۱۸
شکل (۲-۹) تفاوت مهاربندهای قطری معمولی با مهاربندهای کمانش ناپذیر..... ۲۰
شکل (۲-۱۰) تفاوت نمودارهای هیسترزیس مهاربندها تحت بارگذاری‌های رفت و برگشت..... ۲۰
شکل (۲-۱۱) طرح هندسی از یک نوع مهاربند کمانش ناپذیر موسوم به مهاربندهای نچسب..... ۲۱
شکل (۲-۱۲) نمایی از ساختمان مجهز به سیستم مهاربندهای کمانش ناپذیر..... ۲۲
شکل (۲-۱۳) نمایی از دانشگاه آنکونا در کشور ایتالیا..... ۲۲
شکل (۲-۱۴) کمانش در مودهای بالاتر مهاربندهای کمانش ناپذیر..... ۲۴
شکل (۲-۱۵) انواع مختلف مقاطع مهاربندهای کمانش ناپذیر..... ۲۵
شکل (۲-۱۶) نمایش قسمت محصور نشده هسته‌ی فولادی..... ۲۶
شکل (۲-۱۷) نمایش فضای خالی داخلی به منظور رفتار مطلوب مهاربند در کشش و فشار..... ۲۸
شکل (۲-۱۸) گونه رایج مهاربندهای نچسب..... ۲۹
شکل (۲-۱۹) تورم غلاف فلزی بدلیل عدم عمل‌آوری مناسب بتن..... ۲۹
شکل (۲-۲۰) مهاربند تحت بار محوری..... ۳۰
شکل (۲-۲۱) طرحی از مهاربند BRB..... ۳۲

شکل (۲-۲۲) جزئیات و شکل هندسی عضو هسته‌ی فولادی برای ده نمونه آزمایش با مواد نچسب مختلف ۳۴
شکل (۲-۲۳) تجهیزات آزمایشگاهی جهت آزمایش مواد نچسب مختلف ۳۴
شکل (۲-۲۴) تفاوت بارهای محوری تحت بارگذاری چرخه‌ای ۳۵
شکل (۲-۲۵) طرحی از یک مهاربند کمانش ناپذیر معمولی ۳۷
شکل (۲-۲۶) ابعاد تئوری طول کلی مهاربند BRB (طول گره تا گره) ۳۸
شکل (۲-۲۷) طول ناحیه اتصال ۳۸
شکل (۲-۲۸) مشخصات طول مهاربند BRB ۳۸
شکل (۲-۲۹) طرح کلی از تغییر شکل مهاربند در برابر زاویه جابجایی داخلی طبقات ۳۹
شکل (۲-۳۰) نسبت کرنش مهاربند به نسبت جابجایی طبقات در برابر زاویه نسبی مهاربند به تیر ۴۰
شکل (۲-۳۱) نمونه‌ای از مهاربند کمانش ناپذیر با دو هسته‌ی مرکزی جهت استفاده در ظرفیت‌های بالای مهاربند ۴۱
شکل (۲-۳۲) پاسخ‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نمونه‌های BRB با دو صفحه برای هسته مرکزی ۴۱
شکل (۲-۳۳) نمونه ای از مودهای خرابی غیر دلخواه مهاربند BRB ناشی از ناپایداری کلی آن ۴۳
شکل (۲-۳۴) جزییات نگهدارنده (stopper) در مهاربندهای کمانش ناپذیر ۴۳
شکل (۲-۳۵) نمونه‌ای از اتصال غلاف به غلاف با استفاده از جوش در ورق‌های منقطع اتصال ۴۴
شکل (۲-۳۶) نمایش چندین نوع اتصال غلاف به یکدیگر با استفاده از پیچ ۴۴
شکل (۲-۳۷) نمودار خستگی ۴۷
شکل (۲-۳۸) تعیین سیکل حد خستگی ۴۷
شکل (۲-۳۹) نحوه‌ی اعمال سایش فلز جهت کاهش در تمرکز تنش اعمالی ۵۰
شکل (۲-۴۰) جزییات سطح مقطع نمونه‌ی مهاربندی ۵۱
شکل (۲-۴۱) رفتار مهاربندهای با نگهدارنده و بودن آن ۵۱
شکل (۲-۴۲) جزییات نمونه ی مهاربندی BRB با نگهدارنده ۵۲
شکل (۲-۴۳) آماده نمودن تجهیزات آزمایشگاهی ۵۳

شکل (۲-۴۴) چرخه‌ی تنش –کرنش..... ۵۴
شکل (۲-۴۵) مولفه‌های تشکیل دهنده مهاربندBRB..... ۵۶
شکل (۲-۴۶) اعمال نیرو و تغییر مکان به مهاربندBRB..... ۵۷
شکل (۲-۴۷) سطح مقطع نمونه مهاربند پیشنهادی..... ۵۹
شکل (۲-۴۸) پاسخ‌های هیسترزیس تمامی مهاربندهای پیشنهادی..... ۶۱
شکل (۲-۴۹) استفاده از مهاربندهای RLBRB در یک قاب ساختمانی..... ۶۴
شکل (۲-۵۰) موقعیت‌های مختلف محل قرارگیری مهاربند RLBRB..... ۶۵
شکل (۲-۵۱) تغییر در بار بحرانی کمانش..... ۶۶
شکل (۳-۱) موقعیت نقاط نصب کرنش‌سنج و LVDT در نمونه‌های آزمایشگاهی..... ۷۲
شکل (۳-۲) نمونه‌ی تهیه شده از سپری نمره ۳ جهت انجام آزمایش..... ۷۳
شکل (۳-۳) نمونه‌ی پیچ‌های مورد استفاده در آزمایشات..... ۷۵
شکل (۳-۴) محل قرارگیری پیچ‌های ۸/۸ در Set-up آزمایشگاه..... ۷۵
شکل (۳-۵) ساختار کلی کرنش‌سنج..... ۷۶
شکل (۳-۶) ساختار مدار سنسور کرنش‌سنج..... ۷۷
شکل (۳-۷) نحوه عملکرد سنسور کرنش‌سنج در هنگام اعمال بار..... ۷۷
شکل (۳-۸) شکل ظاهری کرنش‌سنج..... ۷۸
شکل (۳-۹) موقعیت محل نصب کرنش‌سنج در تمامی سپری‌ها..... ۷۹
شکل (۳-۱۰) موقعیت محل نصب تغییر مکان‌سنج‌ها در تمامی نمونه‌های آزمایش..... ۸۰
شکل (۳-۱۱) نامگذاری نمونه‌های مورد آزمایش..... ۸۱
شکل (۳-۱۲) مراحل روند بارگذاری آزمایش اول..... ۸۲
شکل (۳-۱۳) گسیختگی نمونه‌ی سپری شکل پس از بارگذاری..... ۸۳
شکل (۳-۱۴) دستگاه ثبت اطلاعات..... ۸۳
شکل (۳-۱۵) منحنی تنش-کرنش نمونه‌ی سپری شکل فولادی..... ۸۴
شکل (۳-۱۶) مراحل روند بارگذاری آزمایش دوم..... ۸۵

شکل (۳-۱۷) گسیختگی نمونه‌ی TU در حین بارگذاری ۸۶
شکل (۳-۱۸) منحنی هیسترزیس المان سپری شکل در مدل آزمایشگاهی شماره ۲ (TU) ۸۷
شکل (۳-۱۹) منحنی پوش هیسترزیس المان سپری شکل در مدل آزمایشگاهی شماره ۲ (TU) ۸۷
شکل (۳-۲۰) منحنی انرژی-چرخه بارگذاری المان سپری در مدل آزمایشگاهی شماره ۲ (TU) ۸۸
شکل (۳-۲۱) میزان ماکزیمم تغییرمکان و نیروی متحمل شده توسط المان سپری در منحنی هیسترزیس آزمایش TU ۸۹
شکل (۳-۲۲) منحنی انرژی تجمعی- چرخه بارگذاری المان سپری در آزمایش ۲ (TU) ۹۰
شکل (۳-۲۳) اجزای تشکیل دهنده‌ی آزمایش نمونه‌ی سوم(TUSW) ۹۱
شکل (۳-۲۴) تعبیه ورق‌های فولادی جهت جلوگیری از بیرون‌زدگی غلاف چوبی ۹۲
شکل (۳-۲۵) استفاده از پیچ برای جلوگیری از حرکت و لغزش غلاف چوبی در حین بارگذاری ۹۳
شکل (۳-۲۶) شکل شماتیکی از غلاف چوبی مقید کننده ۹۳
شکل (۳-۲۷) مراحل انجام تحلیل مقدماتی بر روی مدل آزمایشگاهی شماره ۳ (TUSW) ۹۴
شکل (۳-۲۸) منحنی هسیترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی ۳ (TUSW) ... ۹۵
شکل (۳-۲۹) منحنی پوش هیسترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی شماره ۳ (TUSW) ۹۵
شکل (۳-۳۰) منحنی انرژی-چرخه بارگذاری المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی شماره ۳ (TUSW) ۹۶
شکل (۳-۳۱) منحنی انرژی تجمعی- چرخه بارگذاری المان سپری در آزمایش ۳ (TUSW) ۹۸
شکل (۳-۳۲) کمانش هسته‌ی فولادی سپری شکل و له‌شدگی غلاف چوبی ۹۹
شکل (۳-۳۳) وقوع ترک در غلاف چوبی در حین کمانش هسته‌ی فولادی ۱۰۰
شکل (۳-۳۴) مراحل انجام تحلیل بر روی مدل آزمایشگاهی نمونه‌ی شماره ۴(TUSM) ۱۰۱
شکل (۳-۳۵) منحنی هیسترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی ۴ ..... ۱۰۲
شکل (۳-۳۶) منحنی پوش هیسترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی ۴ (TUSM) ۱۰۲

شکل (۳-۳۷) منحنی انرژی-چرخه بارگذاری المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی شماره ۴ (TUSM) ۱۰۳
شکل (۳-۳۸) منحنی انرژی تجمعی- چرخه بارگذاری المان سپری در آزمایش ۴ (TUSM) ۱۰۵
شکل (۳-۳۹) انهدام نمونه‌ی آزمایشگاهی شماره ۴ با تخریب غلاف چوبی ۱۰۶
شکل (۳-۴۰) اجزای تشکیل دهنده‌ی آزمایش نمونه‌ی پنجم(TUSS) ۱۰۷
شکل (۳-۴۱) مراحل انجام تحلیل بر روی مدل آزمایشگاهی شماره ۵ (TUSS) ۱۰۸
شکل (۳-۴۲) منحنی هیسترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی ۵ (TUSS) ... ۱۰۹
شکل (۳-۴۳) منحنی پوش هیسترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی ۵ (TUSS) ۱۰۹
شکل (۳-۴۴) منحنی انرژی-چرخه بارگذاری المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی شماره ۵ (TUSS) ۱۱۰
شکل (۳-۴۵) منحنی انرژی تجمعی- چرخه بارگذاری المان سپری در آزمایش ۵ (TUSS) ۱۱۲
شکل (۳-۴۶) انهدام نمونه‌ی آزمایشگاهی شماره ۵ (TUSS) ۱۱۳
شکل (۳-۴۷) مراحل انجام تحلیل بر روی مدل آزمایشگاهی شماره ۶ (TUSSWO) ۱۱۴
شکل (۳-۴۸) منحنی هسیترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی ۶ (TUSSWO) ۱۱۵
شکل (۳-۴۹) منحنی پوش هیسترزیس المان هسته‌ی فولادی سپری شکل، در مدل آزمایشگاهی شماره ۶ (TUSSWO) ۱۱۵
شکل (۳-۵۰) منحنی انرژی چرخه بارگذاری المان هسته‌ی فولادی ، در مدل آزمایشگاهی شماره ۶ (TUSSWO) ۱۱۶
شکل (۳-۵۱) منحنی انرژی تجمعی- چرخه بارگذاری المان سپری در آزمایش ۶ (TUSSWO) ۱۱۸
شکل (۳-۵۲) انهدام نمونه‌ی آزمایشگاهی شماره ۶ با تشکیل موج سینوسی در هسته ۱۱۹
شکل (۳-۵۳) مقایسه میان منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های مقید شده با غلاف چوبی ۱۲۰
شکل (۳-۵۴) مقایسه میان منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های مقید شده با غلاف فلزی ۱۲۱

شکل (۳-۵۵) مقایسه میان منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های آزمایشگاهی چهارم و ششم ۱۲۱
شکل (۳-۵۶) مقایسه میان منحنی‌های انرژی نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۲۳
شکل (۳-۵۷) منحنی هیسترزیس قاب سه طبقه مجهز به مهاربندهای کمانش ناپذیر ۱۲۴
شکل (۴-۱) ایجاد مفاصل پلاستیک در حلقه فولادی شکل‌پذیر ۱۲۶
شکل (۴-۲) موقعیت قرارگیری عضو مستهلک کننده به همراه جزییات ساخت آن در مهاربند ۱۲۸
شکل (۴-۳) طرح شماتیکی از نمونه‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس ۱۲۹
شکل (۴-۴) موقعیت المان سپری شکل در مهاربند مورد تحلیل ۱۳۲
شکل (۴-۵) هندسه المان SOLID ۱۳۳
شکل (۴-۶) تصویر مش‌بندی هسته‌ی سپری شکل به همراه صفحات اتصال در نرم‌افزار آباکوس ۱۳۵
شکل (۴-۷) تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ای ۱۳۶
شکل (۴-۸) منحنی بارگذاری اعمالی ۱۳۶
شکل (۴-۹) استفاده از فنرهایی با فاصله مساوی در هر دو جهت احتمال کمانش هسته ۱۳۸
شکل (۴-۱۰) منحنی تنش-کرنش ایده‌آل هسته‌ی سپری شکل فولادی ۱۳۹
شکل (۴-۱۱) وضعیت تنش در هسته‌ی سپری شکل فولادی ۱۳۹
شکل (۴-۱۲) نمودار هیسترزیس هسته‌ی سپری شکل فولادی در مدل اجزای محدود شماره ۱(تحلیل مقدماتی) ۱۴۰
شکل (۴-۱۳) مقایسه منحنی هیسترزیس مدل اجزای محدود تحلیل مقدماتی با آزمایش ششم (TUSSWO) ۱۴۰
شکل (۴-۱۴) منحنی پوش هیسترزیس المان هسته‌ی سپری شکل در مدل اجزاء محدود شماره ۱(تحلیل مقدماتی) ۱۴۱
شکل (۴-۱۵) مقایسه منحنی پوش هیسترزیس مدل اجزای محدود تحلیل مقدماتی و آزمایش ششم (TUSSWO) ۱۴۱
شکل (۴-۱۶) منحنی انرژی-چرخه بارگذاری المان سپری در مدل اجزای محدود شماره ۱(تحلیل مقدماتی) ۱۴۲

شکل (۴-۱۷) مقایسه منحنی انرژی-چرخه بارگذاری مدل اجزای محدود تحلیل مقدماتی و آزمایش ششم(TUSSWO)..... ۱۴۲
شکل (۴-۱۸) تقسیم هسته در جهت ضخامت به دو بخش در مدل‌سازی تحلیلی نهایی..... ۱۴۵
شکل (۴-۱۹) ابعاد مش‌بندی در هسته و غلاف..... ۱۴۶
شکل (۴-۲۰) بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی مدل تحلیل نهایی در نرم‌افزار آباکوس..... ۱۴۶
شکل (۴-۲۱) تشکیل امواج سینوسی در هسته در مدل تحلیلی نهایی ۱۴۷
شکل (۴-۲۲) نمودار هیسترزیس هسته‌ی سپری شکل فولادی در مدل اجزای محدود شماره ۲(تحلیل نهایی) ۱۴۸
شکل (۴-۲۳) مقایسه منحنی هیسترزیس مدل اجزای محدود تحلیل نهایی با آزمایش ششم (TUSSWO) ۱۴۸
شکل (۴-۲۴) منحنی پوش هیسترزیس المان هسته‌ی سپری شکل در مدل اجزاء محدود شماره ۲(تحلیل نهایی)..... ۱۴۹
شکل (۴-۲۵) مقایسه منحنی پوش هیسترزیس مدل اجزای محدود تحلیل نهایی و آزمایش ششم (TUSSWO) ۱۴۹
شکل (۴-۲۶) منحنی انرژی-چرخه بارگذاری المان سپری در مدل اجزای محدود شماره ۲(تحلیل نهایی) ۱۵۰
شکل (۴-۲۷) مقایسه منحنی انرژی-چرخه بارگذاری مدل اجزای محدود تحلیل نهایی و آزمایش ششم(TUSSWO)..... ۱۵۰
شکل (۴-۲۸) منحنی انرژی تجمعی- چرخه بارگذاری مدل اجزای محدود تحلیل نهایی ۱۵۲

فهرست جداول

جدول (۲-۱) تفاوت مواد نچسب مختلف ۳۴
جدول (۲-۲) نتایج آزمایش نمونه‌های مهاربندی BRB ۵۴
جدول (۲-۳) مشخصات نمونه‌های مهاربندی تماما فولادی ۵۹
جدول (۲-۴) نتایج آنالیز نمونه‌های مهاربندی پیشنهادی ۶۰
جدول (۲-۵) تحقیقات صورت گرفته طی سالیان گذشته با دامنه‌ی کرنشی بالا ۶۵
جدول (۳-۱) نحوه‌ی نامگذاری نمونه‌های مورد آزمایش ۸۰
جدول (۳-۲) نتایج کلی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی ۵ نمونه ۱۲۲
جدول (۴-۱) چرخه‌های بارگذاری هسته‌ی فولادی سپری شکل به صورت کنترل تغییر مکان ۱۳۶
جدول (۴-۲) مشخصات مکانیکی اعضاء در نرم‌افزار آباکوس ۱۳۷
جدول (۴-۳) مقایسه نتایج میان مدل اجزای محدود تحلیل اولیه و آزمایش TUSSWO ۱۴۴
جدول (۴-۴) مقایسه نتایج میان مدل اجزای محدود تحلیل اولیه و آزمایش TUSSWO ۱۵۲
جدول (۴-۵) نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و عددی ۱۵۴

فصل ۱:

مقدمه