دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران–سازه

مطالعه آزمایشگاهی و عددی شکل‌پذیری مهاربندهای فولادی با در نظر گرفتن جزئیات ورق اتصال

علی‌رضا فولادوند

استاد راهنما:

دکتر علی‌اکبر آقاکوچک

استاد مشاور:

دکتر شریف شاه‌بیک

بهمن ۱۳۹۱

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای:

را با عنوان:

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما			
۲- استاد مشاور			
۳- استاد مشاور			
۴- استاد ممتحن			
۵- استاد ممتحن			
۶- نماینده گروه			

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

امیدوارم در تمامی مراحل زندگی، بتوانم موجبات سرافرازی ایشان را فراهم آورم

تشکر و قدردانی

ستایش گر معلمی، هستم که چگونه اندیشیدن را به من آموخت نه اندیشه‌ها را

بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر علی‌اکبر آقاکوچک که در تمامی مراحل و تدوین این پایان‌نامه در طی دو سال از کمک‌ها و راهنمایی‌های دلسوزانه و ارزشمند ایشان بهره‌مند بوده‌ام و همچنین از استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر شریف شاه‌بیک به خاطر همراهی و مشاوره ارزشمندشان کمال تشکر و قدردانی را نمایم. از دوستان عزیزم به ویژه هم‌کلاسی‌های مهندسی سازه ورودی ۱۳۸۹ خاطر صمیمیتشان سپاس‌گذارم. این پایان‌نامه با حمایت و پشتیبانی سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور اجرا شده شده است و کمال تشکر و قدردانی از این سازمان می‌شود. امید است مجموعه حاضر گامی هر چند کوچک در پیشرفت علم مهندسی سازه باشد.

چکیده

قاب‌های مهاربندی ویژه فولادی از سیستم‌های متداول سازه‌ای برای مقابله با بارهای جانبی می‌باشند. این‌گونه سیستم‌های سازه‌ای علاوه بر تأمین سختی و مقاومت، بسیار اقتصادی‌اند. برای تأمین رفتار مناسب قاب در برابر زلزله نیاز به اعمال ضوابطی برای تأمین شکل‌پذیری قاب‌های مهاربندی به منظور استهلاک انرژی وجود دارد که آئین‌نامه‌های لرزه‌ای و پژوهش‌های گذشته ضوابطی را برای قسمت ورق اتصال ارائه کرده‌اند.

در این پژوهش رفتار چهار نمونه قاب مهاربندی ویژه فولادی با مهاری قطری به صورت زیرسازه‌ای متشکل از یک دهانه قاب مهاربندی با اعمال بار جانبی چرخه‌ای به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه اول بر اساس ضوابط آئین‌نامه با تأمین فاصله آزاد خمش مستقیم و نمونه دوم با تأمین فاصله آزاد خمش بیضی شکل و دو نمونه نیز به همراه سخت‌کننده طراحی و در آزمایشگاه ساخته شده‌اند. سخت‌کننده‌ها بر اساس ظرفیت خمش فرا ارتجاعی عضو مهاربند طرح شده‌اند تا شرایط انتهای گیردار را برای مهاربند فراهم آورند. نمونه‌های طراحی شده به روش تأمین فاصله آزاد، منجر به طرح ورق‌های اتصال بزرگی می‌شوند. با باریک کردن ورق اتصال در محل اتصال به مهاربند ضمن اقتصادی کردن طرح، سختی کم‌تر در ناحیه ورق اتصال و کاهش تجمع کرنش‌های فرا ارتجاعی در میانه مهاربند نتیجه می‌شود. نتایج آزمایش‌ها عملکرد لرزه‌ای مطلوب مورد انتظار را برای تمام نمونه‌ها نشان داده و نمونه‌ها تائید نموده‌اند که قاب‌های مهاربندی ویژه شکل‌پذیری لازم را به خوبی تأمین می‌کنند. نمونه‌های به همراه سخت‌کننده مقاومت فشاری بالایی دارند. همچنین ورق اتصال کوچک‌تری نیاز دارند و برای سازه‌های بلند می‌توانند اقتصادی‌تر باشند. در ادامه تحقیق مدل‌سازی المان محدود نمونه‌ها انجام شده و با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردیده است. سپس با ساخت مدل‌های بیشتر اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار، اثر پارامترهای موثر شامل هندسه، ابعاد ورق اتصال، اثر فاصله آزاد خمش مستقیم و بیضی شکل ورق اتصال، نسبت عرض به ضخامت عضو مهاربند، ضخامت ورق اتصال و جزئیات سخت‌کننده‌ها بر رفتار قاب‌های مهاربندی شده بررسی شده است.

کلید واژه: قاب مهاربندی ویژه فولادی، ورق اتصال، شکل‌پذیری، سخت کننده.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... و

فهرست شکل‌ها ..... ح

فصل یک- مقدمه ۱

فصل دو- پیشینه تحقیق ۷

۲-۱- رفتار عضو مهاربند ۷

۲-۱-۱- کان و هانسون در سال ۱۹۷۶ ..... ۷

۲-۱-۲- گول و ژان در سال ۱۹۷۸ ..... ۸

۲-۱-۳- آستانه‌اصل و همکاران در سال ۱۹۸۵ ..... ۸

۲-۱-۴- اصلانی و گول در سال ۱۹۸۹ ..... ۹

۲-۱-۵- شابک در سال ۲۰۰۱ ..... ۱۰

۲-۱-۶- یوریز و مهین در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸ ..... ۱۱

۲-۱-۷- کانوینده و همکاران در سال ۲۰۰۸ ..... ۱۱

۲-۱-۸- مهین و همکاران در سال ۲۰۱۰ ..... ۱۳

۲-۲- رفتار ورق اتصال ۱۴

۲-۲-۱- آستانه اصل و همکاران در سال ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۸ ..... ۱۴

۲-۲-۲- رابینویچ و چنگ در سال ۱۹۹۳ ..... ۱۶

۲-۲-۳- آستانه‌اصل در سال ۱۹۹۸ ..... ۱۷

۲-۲-۴- یام و چنگ در سال ۲۰۰۲ ..... ۲۱

۲-۲-۵- هرمن و همکاران در سال ۲۰۰۷ ..... ۲۴

۲-۲-۶- یو و لمن و ردر در سال ۲۰۰۸..... ۲۵
۲-۲-۶-۱- فاصله آزاد انتهایی ۲۸
۲-۲-۶-۲- هندسه و ضخامت ورق اتصال..... ۲۸
۲-۲-۶-۳- اندازه تیرها و ستون‌ها و زاویه مهاربند..... ۲۹
۲-۲-۶-۴- طول جوش اتصال مهاربند به ورق اتصال..... ۳۱
۲-۲-۷- پاول و همکاران در سال ۲۰۱۰..... ۳۱
۲-۲-۸- ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱..... ۳۳
۲-۳- پژوهش‌های انجام شده در دانشگاه تربیت مدرس ۳۵
۲-۳-۱- قلمی‌فرد و آقاکوچک در سال ۲۰۰۸..... ۳۵
۲-۳-۲- علی‌پور و آقاکوچک در سال ۲۰۱۰..... ۳۸
فصل سه- طراحی نمونه‌ها ۴۲
۳-۱- مقدمه ۴۲
۳-۲- طراحی ورق اتصال ۴۳
۳-۲-۱- روش طراحی بار یکنواخت..... ۴۴
۳-۲-۲- روش طراحی بهینه..... ۴۷
۳-۳- طراحی اتصال‌ها ۵۱
۳-۳-۱- نیروی مهاربند ۵۱
۳-۳-۲- اتصال مهاربند به ورق‌اتصال..... ۵۲
۳-۳-۳- محدوده کشش برای ورق اتصال..... ۵۲
۳-۳-۴- کمانش ورق اتصال..... ۵۳
۳-۳-۵- گسیختگی کششی در مقطع ضعیف مهاربند..... ۵۳
۳-۳-۶- طراحی جوش ورق اتصال به تیر و ستون..... ۵۳

۳-۳-۷- طراحی سخت کننده‌ها ۵۴
۳-۴- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی ۵۷
فصل چهار- اجرا و نتایج آزمایشگاهی ۵۸
۴-۱- مقدمه ۵۹
۴-۲- نحوه اجرای آزمایش ۵۹
۴-۳- تعیین مشخصات مکانیکی مصالح با آزمایش کشش فولاد نمونه‌ها ۶۲
۴-۴- مکانیزم جاری شدگی و شکست ۶۵
۴-۵- نمونه اول (T-L2T) ۶۶
۴-۵-۱- جابجایی نسبی اولیه، ٪۰ تا ٪۱/۲۵ ..... ۶۷
۴-۵-۲- جابجایی نسبی متوسط، ٪۱/۲۵ تا ٪۲/۷۵ ..... ۷۰
۴-۵-۳- جابجایی نسبی زیاد، بیش‌تر از ٪۲/۷۵ ..... ۷۲
۴-۵-۴- خلاصه نتایج آزمایش نمونه اول (T-L2T) ۷۴
۴-۶- نمونه دوم (R-E8T) ۷۵
۴-۶-۱- جابجایی نسبی اولیه، ٪۰ تا ٪۱/۲۵ ..... ۷۶
۴-۶-۲- جابجایی نسبی متوسط، ٪۱/۲۵ تا ٪۲/۷۵ ..... ۷۷
۴-۶-۳- جابجایی نسبی زیاد، بیش‌تر از ٪۲/۷۵ ..... ۷۸
۴-۶-۴- خلاصه نتایج آزمایش نمونه دوم (R-L8T) ۸۰
۴-۷- نمونه سوم (T-STIFF-01) ۸۰
۴-۷-۱- جابجایی نسبی اولیه، ٪۰ تا ٪۱/۲۵ ..... ۸۱
۴-۷-۲- جابجایی نسبی متوسط، ٪۱/۲۵ تا ٪۲/۷۵ ..... ۸۳
۴-۷-۳- جابجایی نسبی زیاد، بیش‌تر از ٪۲/۷۵ ..... ۸۴

۴-۷-۴- خلاصه نتایج آزمایش نمونه سوم (T-STIFF-01)..... ۸۶
۴-۸- نمونه چهارم (T-STIFF-02) ۸۷
۴-۸-۱- جابجایی نسبی اولیه، ٪۰ تا ٪۱/۲۵..... ۸۷
۴-۸-۲- جابجایی نسبی متوسط، ٪۱/۲۵ تا ٪۲/۷۵..... ۸۹
۴-۸-۳- جابجایی نسبی زیاد، بیش‌تر از ٪۲/۷۵..... ۹۰
۴-۸-۴- خلاصه نتایج آزمایش نمونه چهارم (T-STIFF-02)..... ۹۱
۴-۹- تفسیر داده‌های آزمایشگاهی ۹۲
۴-۹-۱- سختی و مقاومت نمونه‌ها..... ۹۲
۴-۹-۲- ظرفیت کمانشی عضو مهاربند..... ۹۳
۴-۹-۲-۱-درصد مشارکت ظرفیت کششی مهاربندها در ظرفیت سیستم..... ۹۵
۴-۹-۳- کمانش خارج از صفحه عضو مهاربند و ورق اتصال..... ۹۶
۴-۹-۴- شکل پذیری ۹۸
۴-۱۰- آزمایش بارگذاری تک چرخه‌ای قاب ۹۸
۴-۱۰-۱- آزمایش بارگذاری تک چرخه‌ای قاب بدون مهاربند نمونه دوم..... ۹۹
۴-۱۰-۲- آزمایش بارگذاری تک چرخه‌ای قاب بدون مهاربند و بدون ورق اتصال نمونه دوم..... ۹۹
۴-۱۰-۳- آزمایش بارگذاری تک چرخه‌ای قاب بدون مهاربند نمونه چهارم..... ۱۰۱
فصل پنج- مدل‌سازی عددی، اعتبار سنجی و مطالعه پارامتری ۱۰۳
۵-۱- مقدمه ۱۰۴
۵-۲- مدل سازی در نرم افزار المان محدود ۱۰۴
۵-۲-۱- مشخصات نمونه‌های مدل سازی شده..... ۱۰۴
۵-۲-۲- مشخصات مصالح..... ۱۰۶
۵-۲-۳- عیوب اولیه قطعه..... ۱۰۶

۵-۲-۴- بارگذاری ۱۰۷
۵-۲-۵- شرایط مرزی ۱۰۷
۵-۲-۶- تحلیل شکست ۱۰۸
۵-۳- اعتبار سنجی نمونه‌ها ۱۰۸
۵-۳-۱- اعتبار سنجی نمونه اول ۱۰۹
۵-۳-۲- اعتبارسنجی نمونه دوم ۱۱۳
۵-۳-۳- اعتبار سنجی نمونه سوم ۱۱۶
۵-۳-۴- اعتبار سنجی نمونه چهارم ۱۱۹
۵-۳-۵- مقایسه داده‌های عددی ۱۲۲
۵-۳-۵-۱-استهلاک انرژی ۱۲۲
۵-۳-۵-۲-کرنش فراراتجاعی معادل متناظر با شروع ترک ۱۲۴
۵-۴- مطالعه پارامتری ۱۲۵
۵-۴-۱- نمونه‌های طرح شده دارای ورق اتصال با فاصله آزاد خمش مستقیم ۱۲۵
۵-۴-۲- نمونه‌های طرح شده دارای ورق اتصال با فاصله آزاد خمش بیضوی ۱۳۲
۵-۴-۳- نمونه‌های طرح شده دارای ورق اتصال به همراه سخت کننده ۱۳۶
فصل شش- نتیجه‌گیری ۱۴۱
۶-۱- مقدمه ۱۴۲
۶-۲- بحث و بررسی نتایج ۱۴۳
۶-۲-۱- نتایج مطالعه آزمایشگاهی ۱۴۳
۶-۲-۲- نتایج مطالعه عددی ۱۴۶
۶-۳- نتیجه‌گیری ۱۴۷
۶-۴- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ۱۴۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱ مشخصات نمونه‌های مطالعه قلمی‌فرد و همکاران..... ۳۶

جدول ۳-۱ ترتیب مکانیزم گسیختگی در روش طراحی بهینه..... ۴۲

جدول ۳-۲ مقادیر پیشنهادی ضریب β بر اساس عملکرد و مکانیزم شکست آن..... ۴۳

جدول ۳-۳ ابعاد و مشخصات مصالح ۵۱

جدول ۴-۱ ابعاد و مشخصات مکانیکی نمونه‌های دمبلی..... ۵۷

جدول ۴-۲ علائم عملکرد خرابی در سیستم قاب مهاربندی ویژه..... ۵۸

جدول ۴-۳ سختی و مقاومت نمونه‌ها..... ۸۴

جدول ۴-۴ نیروهای مهاربند نتایج آزمایشگاهی به نیروی طراحی AISC..... ۸۶

جدول ۴-۵ عملکرد نمونه‌های آزمایش شده..... ۸۶

جدول ۴- ۶ جابجایی خارج از صفحه میانه مهاربند در نمونه‌های آزمایشگاهی..... ۸۸

جدول ۴-۷ شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی..... ۸۹

جدول ۴-۸ ظرفیت اعضای قاب مهاربندی نمونه دوم..... ۹۲

جدول ۴-۹ ظرفیت اعضای قاب مهاربندی نمونه چهارم..... ۹۳

جدول ۵-۱ ابعاد و مشخصات مکانیکی مصالح..... ۱۰۶

جدول ۵-۲ انرژی مستهلک شده در نمونه‌های اعتبارسنجی شده عددی..... ۱۲۳

جدول ۵-۳ مشخصات مدل‌های دارای ورق اتصال با فاصله آزاد خمش مستقیم..... ۱۲۶

جدول ۵-۴ مقایسه ظرفیت مقاومت نمونه‌های دارای ورق اتصال با فاصله آزاد خمش مستقیم..... ۱۲۸

جدول ۵-۵ مقایسه شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در نمونه‌های دارای فاصله آزاد خمش مستقیم..... ۱۳۰

جدول ۵-۶ مشخصات مدل‌های دارای ورق اتصال با فاصله آزاد خمش بیضوی..... ۱۳۳

جدول ۵-۷ مقایسه ظرفیت مقاومت نمونه‌های دارای ورق اتصال با فاصله آزاد خمش بیضوی..... ۱۳۴
جدول ۵-۸ مقایسه شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در نمونه‌های دارای فاصله آزاد خمش بیضوی..... ۱۳۵
جدول ۵-۹ مشخصات مدل‌های دارای ورق اتصال به همراه سخت کننده..... ۱۳۷
جدول ۵-۱۰ مقایسه ظرفیت مقاومت نمونه‌های دارای ورق اتصال به همراه سخت کننده..... ۱۳۸
جدول ۵-۱۱ مقایسه شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در نمونه‌های دارای..... ۱۳۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ شمایی از اجرای آزمایشگاهی آقای آستانه‌اصل و همکاران..... ۹

شکل ۲-۲ اجرای نمونه آزمایشی اصلانی..... ۹

شکل ۲-۳ نحوه اجرای کار آزمایش شابک..... ۱۰

شکل ۲-۴ نمونه آزمایشگاهی یوریز و مهین..... ۱۱

شکل ۲-۵ نمای بالای اجرای آزمایش کانوینده وهمکاران..... ۱۲

شکل ۲-۶ قاب مهاربندی آزمایش مهین و همکاران..... ۱۳

شکل ۲-۷ مجموعه آزمایش آستانه‌اصل..... ۱۴

شکل ۲-۸ ایجاد مفاصل فرا ارتجاعی در کمانش خارج از صفحه عضو مهاربند..... ۱۵

شکل ۲-۹ ارائه فاصله آزاد خمش مستقیم و تعمیم مفهوم توزیع تنش ویتمور آستانه‌اصل..... ۱۶

شکل ۲-۱۱ مجموعه آزمایش و نمونه ورق‌های اتصال آزمایش شده توسط آستانه‌اصل..... ۱۸

شکل ۲-۱۲ نمودار نیروی برشی- جابجایی برشی نمونه‌های آزمایش شده..... ۱۹

شکل ۲-۱۳ منحنی‌های لنگر- چرخش برای هر ۳ نمونه..... ۲۰

شکل ۲-۱۴ شکل شماتیکی از ورق‌های اتصال آزمایش یام و چنگ..... ۲۱

شکل ۲-۱۵ اجرای آزمایش اول یام و روند جاری شدن نمونه‌های GP1..... ۲۲

شکل ۲-۱۶ اجرای آزمایش یام و الگوی جاری شدن نمونه تحت اثر بارمحوری همراه با لنگر..... ۲۳

شکل ۲-۱۷ اجرای نمونه‌های آزمایش..... ۲۴

شکل ۲-۱۸ تغییر فرم در اجزای قاب نمونه‌ها..... ۲۴

شکل ۲-۱۹ مدل آزمایشگاهی و نمونه‌ای از مدل‌سازی المان محدود در مطالعه یو..... ۲۶

شکل ۲-۲۰ کمانش در میانه مهاربند و گوشه ورق اتصال در پژوهش یو..... ۲۶

شکل ۲-۲۱ a) رعایت فاصله آزاد ۲t در انتهای مهاربند b) رعایت فاصله آزاد خمش بیضوی ۲۸
شکل ۲-۲۲ در نظر گرفتن هندسه و ضخامت ورق اتصال ۲۹
شکل ۲-۲۳ اعمال تنش‌های فرا ارتجاعی بیش‌تر به ستون در مهاربند با شیب 60° ۳۰
شکل ۲-۲۴ مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی پاول ۳۱
شکل ۲-۲۵ نحوه اجرای آزمایش نمونه‌های پاول ۳۲
شکل ۲-۲۶ شکل اجرای آزمایش و ترتیب بارگذاری در آزمایش‌های ژانگ ۳۳
شکل ۲-۲۷ شبیه سازی مدل آزمایشگاهی ژانگ با نرم‌افزار ANSYS ۳۴
شکل ۲-۲۸ نمودار تأثیر فاصله آزاد انتهایی به ضخامت در آزمایش‌های ژانگ ۳۴
شکل ۲-۲۹ مدل اجزاء محدود پژوهش قلمی‌فرد و همکاران ۳۵
شکل ۲-۳۰ شکل و ابعاد ورق‌های اتصال مدل شده ۳۶
شکل ۲-۳۱ فرم کمانشی عضو مهاری و ورق اتصال در نمونه‌های قلمی‌فرد و همکاران ۳۷
شکل ۲-۳۲ نمونه‌ای از قاب‌های مش‌بندی شده و تحلیل شده ۳۸
شکل ۲-۳۳ مشخصات نمونه‌ها ۳۹
شکل ۳-۱ مدهای جاری‌شدگی و خرابی در سیستم طراحی شده به روش طراحی بهینه ۴۹
شکل ۳-۲ تئوری ایجاد فاصله آزاد خمش بیضی در ورق اتصال ۵۰
شکل ۳-۳ الف) پلان سازه طراحی شده، ب) در نظر گرفتن طبقه پنجم سازه ۴۳
شکل ۳-۴ نحوه توزیع خطوط تنش ۳۰ درجه در نظریه ویتمور ۴۴
شکل ۳-۵ طول شبه ستون‌های تورنتون و عرض موثر ویتمور ۴۵
شکل ۳-۶ نیروهای وارد بر اتصالات طبق روش UFM ۴۶
شکل ۳-۷ ایجاد سوراخ در قسمت ابتدای اتصال مهاربند به ورق اتصال ۵۳
شکل ۳-۸ نمونه ایی از رفتار چرخه‌ایی یک عضو مهاربندی ۵۴
شکل ۳-۹ مکانیزم کمانش در اتصال مهاری دوسر گیردار ۵۶
شکل ۳-۱۰ جزئیات استفاده از سخت کننده در بالا و پائین ورق اتصال ۵۶

شکل ۴-۱ اجزا و اجرای نمونه آزمایشی ۶۰
شکل ۴-۲ محل قرار گیری کرنش سنج و جابجایی سنج‌ها ۶۱
شکل ۴-۳ تاریخچه بارگذاری ATC-24 ۶۱
شکل ۴-۴ سیستم بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی ۶۲
شکل ۴-۵ جزئیات نمونه‌های دمبلی ۶۳
شکل ۴-۶ اجرای آزمایش کششی ۶۳
شکل ۴-۷ منحنی تنش-کرنش واقعی فولاد نمونه‌ها ۶۴
شکل ۴-۸ تعیین تنش جاری شدگی فولاد از روی دیاگرام تنش-کرنش به روش آفست ۶۴
شکل ۴-۹ مکانیزم‌های جاری شدگی و مدهای شکست برای نمونه‌های قاب همگرای ویژه ۶۵
شکل ۴-۱۰ آزمایش نمونه اول ۶۷
شکل ۴-۱۱ Y1 در کناره کنج ستون SE (-0.3%) ۶۷
شکل ۴-۱۲ Y1 در ورق اتصال SW (0.4%) ۶۸
شکل ۴-۱۳ جاری شدگی در اعضای سیستم ۶۸
شکل ۴-۱۴ Y1 در ورق اتصال SW در گوشه محل اتصال به ستون (0.6%) ۶۹
شکل ۴-۱۵ SHS در اتصال تیر به ستون در SE (-1%) ۶۹
شکل ۴-۱۶ توسعه خطوط جاری شدگی در ورق اتصال و مهاربند ۷۰
شکل ۴-۱۷ Y3 در ورق اتصال SW (1.6%) ۷۰
شکل ۴-۱۸ اتصال تیر به ستون ترک خورده ۷۱
شکل ۴-۱۹ شروع WD در ورق اتصال SW در محل گوشه پائینی (-2.4%) ۷۲
شکل ۴-۲۰ کمانه کردن و اعوجاج ورق اتصال SW در فشار (-2.8%) ۷۲
شکل ۴-۲۱ Local Buckling در میانه مهاربند (-2.8%) ۷۳
شکل ۴-۲۲ افزایش WD تا طول ۲۰ میلی‌متر در ورق اتصال SW (-2.8%) ۷۳
شکل ۴-۲۳ Y5 در ورق اتصال SW (3.2%) ۷۳

شکل ۴-۲۴ WD در بالای ورق اتصال SW (-3.2%)..... ۷۴
شکل ۴-۲۵ پاسخ چرخه‌ای نمونه اول..... ۷۵
شکل ۴-۲۶ آزمایش نمونه دوم..... ۷۶
شکل ۴-۲۷ جاری شدگی اولیه در سیستم..... ۷۶
شکل ۴-۲۸ افزایش طول جاری شدگی در گوشه ورق اتصال SW (-1%)..... ۷۷
شکل ۴-۲۹ Y1 در گوشه ورق اتصال SW (-1.2%)..... ۷۷
شکل ۴-۳۰ Y3 در ورق اتصال (-2%)..... ۷۸
شکل ۴-۳۱ SHS در اتصال تیر به ستون SE (2.4%)..... ۷۸
شکل ۴-۳۲ Y5 در ورق اتصال SW (2.8%)..... ۷۹
شکل ۴-۳۳ اعوجاج در ورق اتصال SW متناظر با کشش مهاربند (2.8%)..... ۷۹
شکل ۴-۳۴ کمانش موضعی و تغییر فرم بیضوی در ورق اتصال..... ۷۹
شکل ۴-۳۵ پاسخ نمونه دوم..... ۸۰
شکل ۴-۳۶ آزمایش نمونه سوم..... ۸۱
شکل ۴-۳۷ Y1 در سخت کننده پائینی ورق اتصال SE (-0.1%)..... ۸۲
شکل ۴-۳۸ Y1 در ورق اتصال SE (-0.1%)..... ۸۲
شکل ۴-۳۹ B2 در مهاربند (-1.2%)..... ۸۳
شکل ۴-۴۰ Y5 در سخت کننده بالایی ورق اتصال SE (0.2%)..... ۸۳
شکل ۴-۴۱ کمانش موضعی در میانه دو سر مهاربند (-0.2%)..... ۸۴
شکل ۴-۴۲ BF در میانه مهاربند (-2.8%)..... ۸۵
شکل ۴-۴۳ جاری شدگی در ورق اتصال و شکست میانه مهاربند (-3.2%)..... ۸۵
شکل ۴-۴۴ تشکیل مفاصل خمشی در انتهای اتصال مهاربند (3.2%)..... ۸۶
شکل ۴-۴۵ پاسخ نمونه سوم..... ۸۶
شکل ۴-۴۶ آزمایش نمونه چهارم..... ۸۷

شکل ۴-۴۷ Y1 در ورق اتصال SE (-0.35%)..... ۸۸
شکل ۴-۴۸ Y1 در سخت‌کننده بالایی ورق اتصال NW (1.05%)..... ۸۸
شکل ۴-۴۹ B2 در سر اتصال مهاربند به ورق اتصال SE (-1.05%)..... ۸۹
شکل ۴-۵۰ کمانش موضعی در میانه مهاربند و تغییر فرم در انتهای عضو مهاری (-1.75%)..... ۸۹
شکل ۴-۵۱ Y3 در ورق اتصال SE (-1.75%)..... ۹۰
شکل ۴-۵۲ BF در میانه مهاربند (2.45%)..... ۹۰
شکل ۴-۵۳ نمونه سوم در انتهای بارگذاری (2.8%)..... ۹۱
شکل ۴-۵۴ پاسخ نمونه چهارم..... ۹۱
شکل ۴-۵۵ پوش رفتار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی..... ۹۲
شکل ۴-۵۶ موقعیت کرنش‌سنج‌های روی عضو مهاربند..... ۹۴
شکل ۴-۵۷ شکل و انحنای کمانش مهاربند با شرایط انتهای متفاوت..... ۹۶
شکل ۴-۵۸ نحوه محاسبه جابجایی خارج از میانه عضو مهاری..... ۹۶
شکل ۴-۵۹ تاریخچه بیشینه جابجایی خارج از صفحه میانه عضو مهاری نمونه‌های آزمایشگاهی..... ۹۷
شکل ۴-۶۰ آزمایش بارگذاری تک چرخه روی قاب بدون مهاربند نمونه دوم..... ۹۹
شکل ۴-۶۱ آزمایش بارگذاری تک چرخه روی قاب بدون مهاربند و بدون ورق اتصال نمونه دوم..... ۱۰۰
شکل ۴-۶۲ نمودار رفتار قاب نمونه دوم..... ۱۰۰
شکل ۴-۶۳ آزمایش بارگذاری تک چرخه روی قاب بدون مهاربند مهاربند نمونه چهارم..... ۱۰۱
شکل ۴-۶۴ نمودار رفتار قاب نمونه چهارم..... ۱۰۲
شکل ۵-۱ نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده در نرم افزار مطابق با مدل آزمایشگاهی..... ۱۰۵
شکل ۵-۲ شرایط مرزی اعمالی در مدل سازی..... ۱۰۷
شکل ۵-۳ اعتبارسنجی منحنی چرخه‌ای نمونه اول در چرخه با جابجایی ۸ میلی‌متر..... ۱۰۹
شکل ۵-۴ اعتبارسنجی منحنی چرخه‌ای نمونه اول..... ۱۱۰
شکل ۵-۵ اعتبارسنجی پوش منحنی چرخه‌ای نمونه اول..... ۱۱۰

شکل ۵-۶ اعتبارسنجی جابجایی خارج از صفحه میانه مهاربند نمونه اول ۱۱۱
شکل ۵-۷ مقایسه توزیع تنش نمونه‌های مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی نمونه اول ۱۱۲
شکل ۵-۸ اعتبارسنجی منحنی چرخه‌ای نمونه دوم ۱۱۳
شکل ۵-۹ اعتبارسنجی پوش منحنی چرخه‌ای نمونه دوم ۱۱۳
شکل ۵-۱۰ اعتبارسنجی جابجایی خارج از صفحه میانه مهاربند نمونه دوم ۱۱۴
شکل ۵-۱۱ مقایسه توزیع تنش نمونه‌های مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی نمونه دوم ۱۱۵
شکل ۵-۱۲ اعتبارسنجی منحنی چرخه‌ای نمونه سوم ۱۱۶
شکل ۵-۱۳ اعتبارسنجی پوش منحنی چرخه‌ای نمونه سوم ۱۱۶
شکل ۵-۱۴ اعتبارسنجی جابجایی خارج از صفحه میانه مهاربند نمونه سوم ۱۱۷
شکل ۵-۱۵ مقایسه توزیع تنش نمونه‌های مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی نمونه سوم ۱۱۸
شکل ۵-۱۶ اعتبارسنجی منحنی چرخه‌ای نمونه چهارم ۱۱۹
شکل ۵-۱۷ اعتبارسنجی پوش منحنی چرخه‌ای نمونه چهارم ۱۱۹
شکل ۵-۱۸ اعتبارسنجی جابجایی خارج از صفحه میانه مهاربند نمونه چهارم ۱۲۰
شکل ۵-۱۹ مقایسه توزیع تنش نمونه‌های مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی نمونه چهارم ۱۲۱
شکل ۵-۲۰ استهلاک انرژی سطح زیر منحنی چرخه‌ای ۱۲۲
شکل ۵-۲۱ مقایسه انرژی مستهلک شده مدل‌های عددی ۱۲۳
شکل ۵-۲۲ تاریخچه کرنش معادل فرا ارتجاعی در میانه مهاربند تا لحظه وقوع ترک ۱۲۴
شکل ۵-۲۳ تاریخچه PEEQ در گوشه لبه پائینی ورق اتصال در نمونه عددی اول و دوم ۱۲۴
شکل ۵-۲۴ PEEQ در انتهای مهاربند تا لحظه وقوع ترک در نمونه عددی سوم و چهارم ۱۲۵
شکل ۵-۲۵ مشخصات ابعاد نمونه‌های باریک شده ورق اتصال با فاصله آزاد خمش مستقیم ۱۲۶
شکل ۵-۲۶ مقایسه پوش منحنی چرخه‌ای نمونه‌های دارای فاصله آزاد خمش در ورق اتصال ۱۲۷
شکل ۵-۲۷ مقایسه استهلاک انرژی در نمونه‌های ۱ تا ۵ و ۱۱ تا ۱۳ ۱۳۱
شکل ۵-۲۹ مشخصات ابعاد نمونه‌های مستطیلی ورق اتصال با فاصله آزاد خمش بیضوی ۱۳۳