دانشکده مهندسی

بررسی سختی و خیز تیرهای مسلح شده با میلگرد FRP به کمک آزمایش مودال و الگوریتم ژنتیک

سید روح ا ... موسوی

رساله دکترای مهندسی عمران – گرایش سازه

گروه عمران

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

تابستان ۱۳۹۰

دانشکده مهندسی

بررسی سختی و خیز تیرهای مسلح شده با میلگرد FRP به کمک آزمایش مودال و الگوریتم ژنتیک

سید روح ا ... موسوی

کارشناس عمران، دانشکده مهندسی نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی ، دانشگاه فردوسی مشهد

پایان نامه ارائه شده به دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد برای اخذ درجه دکتری

مهندسی عمران – گرایش سازه

تابستان ۱۳۹۰

دانشکده مهندسی

گروه عمران

تصویب پایان‌نامه

این پایان‌نامه را که آقای سید روح‌الله موسوی تدوین و به این هیات داوران ارائه کرده است، به عنوان بخشی از پژوهش دوره دکتری سازه، مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

نمره: **۱۹/۵** درجه ارزشیابی: **عالی**

استاد راهنمای اول: دکتر محمدرضا اصفهانی – استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

استاد راهنمای دوم: دکتر محمدرضا توکلی‌زاده – استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

استاد مشاور: دکتر احمد شوشتری - استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

استاد مدعو: دکتر عبدالله حسینی – استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

استاد مدعو: دکتر هاشم شریعتمدار – دانشیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

استاد مدعو: دکتر عباس کرم‌الدین - استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محمدباقر شریفی – دانشیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی

گروه عمران

تاییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و همه مطالب آن به غیر از موردهایی که نام مرجع آن آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

سید روح ا... موسوی – دانشجو **تاریخ**

دکتر محمدرضا اصفهانی – استاد راهنما **تاریخ**

تعهدنامه

اینجانب **سیدروح‌الله موسوی دانش آموخته دکتری سازه** در دانشکده **مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد** نویسنده پایان‌نامه **بررسی سختی و خیز تیرهای مسلح شده با میلگرد FRP به کمک آزمایش مودال و الگوریتم ژنتیک** تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمدرضا اصفهانی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه فردوسی مشهد» و یا «Ferdowsi University of Mashhad» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده وجود داشته باشد.

تقدیم به آنکه آفتاب مهرش بر آستان قلبم غروب نخواهد کرد

و عنایت فرمود تا در جوار حرم امنش به تحصیل علم بپردازم

و

تقدیم به فرشتگان الهی من:

پدر و مادر مهربان

و همسر فداکارم

سپاسگزاری

ایزد منّان را شاکرم که در سایه الطاف بی پایان خویش، به بنده حقیرش عنایت فرمود تا در جوار ملکوتی حضرت ثامن الحجج، به تحصیل علم بپردازد. ارزشمندترین درودها را تقدیم به فرشتگان الهی خود؛ پدر و مادر مهربانم؛ می‌نمایم. قطعاً هیچ‌گاه توانایی جبران زحمات این عزیزان را نخواهم داشت، لیکن از حضرت دوست بهترین‌ها را برایشان آرزو دارم. برخود لازم می‌دانم، از زحمات بی‌دریغ استاد ارجمند، جناب آقای دکتر محمدرضا اصفهانی قدردانی نمایم و از ایشان به خاطر راهنمایی‌های ارزنده در طول این پروژه، صمیمانه سپاس‌گزاری کنم. همچنین، از آقای دکتر محمدرضا توکلی‌زاده به خاطر کمک‌های ارزشمند ایشان در انتهای این تحقیق قدردانی می‌شود. موفقیت روزافزون ایشان و دیگر اساتید دلسوز خود را از خداوند منّان خواهانم. ممنون همه اساتید گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد هستم که با دلسوزی هر چه تمام در جهت تکامل همه جانبه دانشجویان تلاش می‌کنند. دراین میان، از زحمات فراوان همسرم در طول پروژه، قدردانی کرده و صبر و شکیبایی او را تحسین می‌کنم. خداوند به من قدرت دهد تا حامی و پشتیبان او باشم. دوستان بنده که برایم از نعمت‌های الهی تلقی می‌شوند، در پیشرفت اینجانب نقش مهمّی را ایفا کردند. خداوند بزرگوار؛ او که مهربان‌ترین است؛ همواره یارشان باد.

« فهرست مطالب»

فهرست مطالب .....الف

فهرست شکل‌ها .....ح

فهرست جداول .....س

فهرست نشانه‌ها .....ص

چکیده فارسی .....ق

فصل اول: کلیات و اهداف رساله

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- اهمیت کار پژوهشی ۲

۱-۳- اهداف رساله ۳

۱-۴- فصل‌بندی مطالب ۴

۱-۵- خلاصه فصل اول ۶

فصل دوم: مفاهیم اولیه و تاریخچه مطالعات (میلگردهای FRP)

۲-۱- پیشگفتار ۷

۲-۲- مقاومت خمشی تیرهای مسلح شده با میلگردهای FRP ۱۰

۲-۲-۱- خردشدن بتن در فشار ۱۱

۲-۲-۲- پارگی میلگردهای FRP ۱۱

۲-۳- عرض ترک ۱۳

۲-۴- شکل‌پذیری ۱۵
۲-۴-۱- شاخص‌های تغییر شکل‌پذیری (انعطاف پذیری) ۱۵
۲-۴-۲- محدودیت آرماتور برای افزایش شکل‌پذیری ۱۸
۲-۵- سخت شوندگی کششی ۱۹
۲-۶- مدل‌های تحلیلی محاسبه خیز ۲۳
۲-۶-۱- محاسبه ممان اینرسی موثر ۲۳
۲-۶-۲- محاسبه خیز با استفاده از روش‌های لنگر- انحنا ۳۱
۲-۶-۳- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه خیز ۳۶
۲-۷- مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP ۴۱
۲-۷-۱- چگونگی شکست پیوستگی در میلگردهای FRP ۴۴
۲-۷-۲- بررسی اثر مقاومت بتن و قطر آرماتور در مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP ۴۶
۲-۸- خلاصه فصل دوم ۴۹

فصل سوم: مفاهیم اولیه و تاریخچه مطالعات (ارزیابی خسارت)

۳-۱- پیشگفتار ۵۱
۳-۲- تاریخچه تخمین خسارت ۵۱
۳-۳- مشخصه‌های دینامیکی درارزیابی خسارت ۵۳
۳-۴- تحلیل در حوزه فرکانس ۵۴
۳-۴-۱- تابع پاسخ فرکانسی سیستم یک درجه آزادی ۵۴
۳-۴-۲- توابع پاسخ فرکانسی سیستم چند درجه آزادی بدون میرایی ۵۶
۳-۵- سفتی خمشی به عنوان شاخص خسارت ۵۸
۳-۶- محاسبه انحنای مودال ۶۲
۳-۷- هموارسازی مودهای بدست آمده از آزمایش مودال ۶۳
۳-۸- گسترش مودها ۶۴
۳-۹- روش‌های ارزیابی خسارت ۶۵

۳-۹-۱- استفاده از سختی مودال ۶۵
۳-۹-۲- استفاده از انحنای مودال ۶۸
۳-۹-۳- آسیب یابی به وسیله بردار نیروهای باقیمانده ۶۹
۳-۹-۴- تعیین توزیع سختی در تیرهای نامعین خسارت‌دیده ۷۰
۳-۱۰- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک ۷۲
۳-۱۰-۱- تعیین طول کروموزوم ۷۳
۳-۱۰-۲- ایجاد جمعیت اولیه ۷۳
۳-۱۰-۳- رمزگشایی ۷۴
۳-۱۰-۴- ارزیابی طرح‌ها ۷۴
۳-۱۰-۵- انتخاب طرح‌های برازنده‌تر برای ایجاد نسل بعد ۷۵
۳-۱۰-۶- اعمال عمل‌گرهای پیوند و جهش بر روی افراد انتخاب شده برای ایجاد نسل بعد..... ۷۷
۳-۱۰-۷- معیارهای همگرایی..... ۷۸
۳-۱۱- خلاصه فصل سوم..... ۷۹

فصل چهارم: کار آزمایشگاهی

۴-۱- پیشگفتار ۸۰
۴-۲- مصالح ۸۰
۴-۲-۱- بتن ۸۱
۴-۲-۲- میلگردهای فولادی ۸۲
۴-۲-۳- میلگردهای GFRP ۸۳
۴-۳- طراحی و ساخت نمونه‌ها ۸۵
۴-۴- چگونگی آزمایش ۸۸
۴-۴-۱- آزمایش استاتیکی ۸۸
۴-۴-۲- آزمایش مودال ۹۲
۴-۴-۲-۱- ابزارهای تحریک ، برداشت پاسخ و پردازش داده‌ها ۹۳

۴-۴-۲-۲- آماده سازی سازه برای آزمایش مودال ۹۶
۴-۵- چگونگی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی ۹۷
۴-۶- خلاصه فصل چهارم ۱۰۰

فصل پنجم: خیز و مقاومت پیوستگی تیرهای مسلح شده با میلگردهای FRP

۵-۱- پیشگفتار ۱۰۲
۵-۲- مدل‌های پیشنهادی ممان اینرسی موثر ۱۰۳
۵-۳- مقایسه تجربی و تحلیلی خیز ۱۰۸
۵-۳-۱- مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۰۸
۵-۳-۲- مقایسه مقادیر خیز تحلیلی و آزمایشگاهی ۱۱۰
۵-۳-۳- مقایسه مقادیر ممان اینرسی موثر تجربی و تحلیلی ۱۱۲
۵-۳-۴- مطالعه آماری روش‌های مختلف محاسبه خیز ۱۱۴
۵-۴- مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۱۸
۵-۵- مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار ۱۲۲
۵-۵-۱- محاسبه مقاومت پیوستگی و طول وصله ۱۲۲
۵-۵-۲- مقایسه مقاومت پیوستگی تحلیلی و آزمایشگاهی ۱۲۸
۵-۶- خلاصه فصل پنجم ۱۳۷

فصل ششم: بررسی خسارت از روی داده‌های آزمایش مودال

۶-۱- پیشگفتار ۱۳۹
۶-۲- تغییرات فرکانس‌ها پس از خسارت ۱۳۹
۶-۳- تغییرات شکل مودها و انحنای مودال پس از خسارت ۱۴۸
۶-۴- به‌هنگام سازی مدل اجزای محدود ۱۵۰
۶-۵- خلاصه فصل ششم ۱۵۵

فصل هفتم: خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- پیشگفتار ۱۵۶
۷-۲- خلاصه و نتیجه‌گیری ۱۵۶
۷-۳- پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده ۱۶۰

مراجع ۱۶۲
پیوست الف: فرکانس نمونه‌های آزمایشگاهی در گام‌های مختلف ۱۷۶
چکیده انگلیسی ۱۸۰

« فهرست شکل‌ها»

فصل دوم: مفاهیم اولیه و تاریخچه مطالعات (میلگردهای FRP)

شکل۲-۱- مقطع و نمای طرح تقویت برشی و خمشی توسط میلگردهای GFRP..... ۸

شکل۲-۲- نمودار تنش و کرنش در مود شکست فشاری بتن..... ۱۱

شکل۲-۳- نمودار تنش و کرنش در مود شکست پارگی آرماتور..... ۱۲

شکل۲-۴- نمودارهای تنش و کرنش مقطع در حالت سرویس ۱۴

شکل۲-۵- چگونگی محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری ۱۶

شکل۲-۶- چگونگی محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری..... ۱۷

شکل۲-۷- سختی اضافی ناشی از سخت شوندگی کششی الف) قطعه خمشی ب)قطعه محوری ۱۹

شکل۲-۸- پارامتر سخت‌شوندگی کششی در منحنی لنگر- انحنا ۲۰

شکل۲-۹- رفتار بتن در کشش پیش از ترک‌خوردگی و پس از آن ۲۱

شکل۲-۱۰- سطح مقطع بتن کششی ۲۲

شکل۲-۱۱- تغییرات پارامتر سخت‌شوندگی کششی در رابطه برانسون ۲۴

شکل۲-۱۲- درون‌یابی خطی انجام شده روی مقادیر تجربی توسط Alsayed و همکاران[2000] ۲۸

شکل۲-۱۳- نمودار لنگر-انحنای دوخطی تیرهای مسلح شده با میلگردهای FRP ۳۲

شکل۲-۱۴- نواحی ترک‌خورده و بدون ترک در خمش چهارنقطه‌ای..... ۳۲

شکل۲-۱۵- تغییرات انحنا در طول تیر..... ۳۳

شکل۲-۱۶- تنش‌های فولاد و بتن درفاصله بین دو ترک متوالی ۳۶

شکل۲-۱۷- اثر مدول الاستیسیته بر خیز GFRP-RC در سطح بار سرویس ۳۷

شکل۲-۱۸- اثر مدول الاستیسیته بر خیز CFRP-RC در سطح بار سرویس ۳۸

شکل۲-۱۹- اثر نسبت آرماتور بر خیز در سطح بار سرویس ۳۸

شکل۲-۲۰- اثر نسبت آرماتور بر خیز نمونه‌های با $\rho_f > \rho_{fb}$ در ۱/۱ سطح بار ترک‌خوردگی ۳۹
شکل۲-۲۱- اثر نسبت آرماتور بر خیز نمونه‌های با $\rho_f < \rho_{fb}$ در ۱/۱ سطح بار ترک‌خوردگی ۴۰
شکل۲-۲۲- مقایسه چگونگی شکست پیوستگی میلگردهای GFRP در بتن‌های معمولی و بتن‌های با مقاومت بالا ۴۵
شکل۲-۲۳- تغییرات تنش پیوستگی حداکثر در مقابل مقاومت بتن ۴۶
شکل۲-۲۴- تغییرات مقاومت پیوستگی در مقابل مقاومت بتن ۴۶
شکل۲-۲۵- مقاومت پیوستگی میلگردهای فولادی در مقابل مقاومت بتن ۴۷
شکل۲-۲۶- مقاومت پیوستگی میلگردهای GFRP ماسه‌پاشی شده در مقابل مقاومت بتن ۴۸
شکل۲-۲۷- مقاومت پیوستگی میلگردهای GFRP دارای الیاف دورپیچ در مقابل مقاومت بتن ۴۸
شکل۲-۲۸- تغییرات مقاومت پیوستگی در مقابل قطر آرماتور ۴۹

فصل سوم: مفاهیم اولیه و تاریخچه مطالعات (ارزیابی خسارت)

شکل۳-۱- سیستم یک درجه آزادی جرم و فنر ۵۴
شکل۳-۲- ارتباط بین تحریک و پاسخ در حوزه‌های زمان و فرکانس ۵۵
شکل۳-۳- اندازه‌گیری FRF ها در یک سازه چند درجه آزادی ۵۸
شکل۳-۴- نمودار FRF یک سازه سه درجه آزادی ۵۸
شکل۳-۵- شبیه‌سازی توزیع خسارت ۵۹
شکل۳-۶- جزء تیری e ام با تغییرات خطی EI ۶۰
شکل۳-۷- درون‌یابی لاگرانژی سفتی خمشی در طول تیر ۶۱
شکل۳-۸- تغییرمکان‌های گرهی جزء تیری ۶۲
شکل۳-۹- تابع‌های درون‌یاب لاگرانژی استفاده شده در برازش شکل مودها ۶۳
شکل۳-۱۰- نمودار جریان تخمین سختی تیرهای نامعین خسارت‌دیده ۷۲
شکل۳-۱۱- انتخاب چرخ‌گردان ۷۶
شکل۳-۱۲- جفت کروموزوم‌ها در استخر آمیزش ۷۷
شکل۳-۱۳- پیوند یک نقطه‌ای ۷۸

شکل۳-۱۴- عمل‌گر جهش ۷۸

فصل چهارم: کار آزمایشگاهی

شکل۴-۱- نمونه میلگرد فولادی آماده شده برای آزمایش کشش ۸۲
شکل۴-۲- نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کششی یکی از نمونه‌های فولادی با قطر ۱۰ میلی‌متر ۸۲
شکل۴-۳- چگونگی قرارگیری نمونه در آزمایش کشش ۸۳
شکل۴-۴- نمونه میلگرد GFRP آماده شده برای آزمایش کشش ۸۴
شکل۴-۵- نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کششی نمونه GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر ۸۴
شکل۴-۶- چگونگی قالب‌بندی و آرماتوربندی نمونه‌ها ۸۷
شکل۴-۷- دستگاه‌های آزمایش استاتیکی ۸۹
شکل۴-۸- تجهیزات اندازه‌گیری تغییرمکان و بار (الف)خط‌کش اندازه‌گیری تغییرمکان (ب)نیروسنج ۸۹
شکل۴-۹- تجهیزات اعمال بار و ثبت داده‌ها (الف) سیستم کنترل فشار و پمپ هیدرولیکی (ب) جک هیدرولیکی (ج) سیستم ثبت داده‌ها و پردازش اطلاعات ۹۰
شکل۴-۱۰- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ها ۹۱
شکل۴-۱۱- چگونگی انتقال نیرو و پاسخ به تحلیل‌گر دو کاناله ۹۳
شکل۴-۱۲- تجهیزات پردازش داده‌ها و اعمال نیروی محرک (الف)تحلیل‌گر دو کاناله (ب)چکش ضربه ۹۴
شکل۴-۱۳- تجهیزات دریافت پاسخ ارتعاشی (شتاب سنج) ۹۵
شکل۴-۱۴ – دامنه حرکت درجه آزادی هشتم (موقعیت شتاب سنج) در پنج مود اول نوسان ۹۵
شکل۴-۱۵- آزمایش مودال به صورت معلق ۹۶
شکل۴-۱۶- فرکانس اصلی و فرکانس جسم صلب در تابع پاسخ فرکانسی ۹۷
شکل۴-۱۷- چگونگی ترک‌خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی ۹۹

فصل پنجم: خیز و مقاومت پیوستگی تیرهای مسلح شده با میلگردهای FRP

شکل۵-۱- تغییرات m در مقابل ρ_f/ρ_{fb} ۱۰۴
شکل۵-۲- تغییرات m در مقابل M_{cr}/M_a ۱۰۴

شکل۵-۳- تغییرات I_e/I_{cr} در مقابل ρ_f/ρ_{fb} ۱۰۴
شکل۵-۴- تغییرات I_e/I_{cr} در مقابل M_{cr}/M_a ۱۰۴
شکل۵-۵- نمودار جریان بهینه‌یابی با الگوریتم ژنتیک ۱۰۷
شکل۵-۶- نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های دارای مقاومت بتن ۲۰ مگاپاسکال و آرماتورگذاری متفاوت ۱۰۹
شکل۵-۷- نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های دارای مقاومت بتن ۳۷ مگاپاسکال و آرماتورگذاری متفاوت ۱۰۹
شکل۵-۸- نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های دارای مقاومت بتن ۶۴ مگاپاسکال و آرماتورگذاری متفاوت ۱۰۹
شکل۵-۹- مقایسه نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های دارای نسبت آرماتور ۰/۰۰۵۷ و مقاومت بتن متفاوت ۱۰۹
شکل۵-۱۰- مقایسه نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های دارای نسبت آرماتور ۰/۰۱۹ و مقاومت بتن متفاوت ۱۰۹
شکل۵-۱۱- مقایسه نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های دارای نسبت آرماتور ۰/۰۲۷۱ و مقاومت بتن متفاوت ۱۰۹
شکل۵-۱۲- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B1 ..... ۱۱۱
شکل۵-۱۳- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B2 ..... ۱۱۱
شکل۵-۱۴- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B3 ..... ۱۱۱
شکل۵-۱۵- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B4 ..... ۱۱۱
شکل۵-۱۶- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B5 ..... ۱۱۱
شکل۵-۱۷- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B6 ..... ۱۱۱
شکل۵-۱۸- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B7 ..... ۱۱۲
شکل۵-۱۹- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B8 ..... ۱۱۲
شکل۵-۲۰- مقادیر تحلیلی و تجربی خیز نمونه B9 ..... ۱۱۲
شکل۵-۲۱- مقایسه تغییرات I_e/I_{cr} تجربی و تحلیلی در مقابل M_a/M_{cr} نمونه B2 ..... ۱۱۳

شکل۵-۲۲- مقایسه تغییرات I_e/I_{cr} تجربی و تحلیلی در مقابل M_a/M_{cr} نمونه B4 ..... ۱۱۳
شکل۵-۲۳- مقایسه تغییرات I_e/I_{cr} تجربی و تحلیلی در مقابل M_a/M_{cr} نمونه B6 ..... ۱۱۳
شکل۵-۲۴- مقایسه تغییرات I_e/I_{cr} تجربی و تحلیلی در مقابل M_a/M_{cr} نمونه B7 ..... ۱۱۳
شکل۵-۲۵- مقایسه تغییرات I_e/I_{cr} تجربی و تحلیلی در مقابل M_a/M_{cr} نمونه B8 ..... ۱۱۴
شکل۵-۲۶- مقایسه تغییرات I_e/I_{cr} تجربی و تحلیلی در مقابل M_a/M_{cr} نمونه B9 ..... ۱۱۴
شکل۵-۲۷- مقایسه خیز مدل‌های تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در سایر پژوهش‌ها ۱۱۶
شکل۵-۲۸- محاسبه‌ی شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۱۸
شکل۵-۲۹- توزیع تنش پیوستگی در طول آرماتور ۱۲۵
شکل۵-۳۰- شکل سطح جانبی میلگردهای FRP استفاده شده در تحقیقات مختلف ۱۲۹
شکل۵-۳۱- مقایسه شکل‌پذیری و مقاومت پیوستگی نمونه‌های B10، B11 و B15 ..... ۱۳۶
شکل۵-۳۲- مقایسه شکل‌پذیری و مقاومت پیوستگی نمونه‌هایB7، B13 و B14 ..... ۱۳۷

فصل ششم: بررسی خسارت از روی داده‌های آزمایش مودال

شکل۶-۱- نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی و تابع همبستگی درجه آزادی یکم نمونه B5 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۴۰
شکل۶-۲- نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی و تابع همبستگی درجه آزادی یکم نمونه B14 در گام بارگذاری L0 ..... ۱۴۱
شکل۶-۳- منحنی‌های FRF درجه آزادی بیستم نمونه B14 ..... ۱۴۱
شکل۶-۴- منحنی‌های FRF درجه آزادی یکم نمونه B14 ..... ۱۴۲
شکل۶-۵- منحنی‌های FRF درجه آزادی بیستم نمونه B5 ..... ۱۴۲
شکل۶-۶- درصد تغییرات نسبی فرکانس طبیعی نمونه‌ها در گام‌های مختلف بارگذاری ۱۴۳
شکل۶-۷- مقایسه تغییرات نسبی فرکانس طبیعی نمونه‌ها ۱۴۶
شکل۶-۸- مقایسه تغییرات نسبی فرکانس طبیعی نمونه‌ها ۱۴۷
شکل۶-۹-تغییرات فرکانس مود یکم نمونه‌های دارای میلگرد جانبی در محل وصله ۱۴۸
شکل۶-۱۰- شکل‌های مود نمونه سالم و خسارت‌خورده B9 ..... ۱۴۸

شکل۶-۱۱- انحنای مودهای یکم تا پنجم نمونه سالم و خسارت خورده B12 ..... ۱۴۹
شکل۶-۱۲- آزمون انجام شده برای تیر سالم B4 ..... ۱۵۲
شکل۶-۱۳- توزیع ممان اینرسی در طول تیر سالم B4 ..... ۱۵۲
شکل۶-۱۴- توزیع ممان اینرسی برای تیرB7 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۲
شکل۶-۱۵- توزیع ممان اینرسی برای تیرB12 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۲
شکل۶-۱۶- آزمون انجام شده برای تیرB7 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۳
شکل۶-۱۷- آزمون انجام شده برای تیرB12 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۳
شکل۶-۱۸- مقایسه ممان‌اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B1 و B2 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۴
شکل۶-۱۹-مقایسه ممان‌اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B4 و B5 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۴
شکل۶-۲۰- مقایسه ممان‌اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B7 تا B9 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۴
شکل۶-۲۱- مقایسه ممان‌اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B1 و B9 در گام بارگذاری L3 ..... ۱۵۴
شکل۶-۲۲- مقایسه ممان‌اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B10 و B14 در گام بارگذاریL3 ..... ۱۵۵

« فهرست جداول»

فصل دوم: مفاهیم اولیه و تاریخچه مطالعات (میلگردهای FRP)

جدول۲-۱- روش‌های پیشنهادی توسط Mota و همکاران [2006] در ۱/۱ بار ترک‌خوردگی ۴۰

فصل چهارم: کار آزمایشگاهی

جدول۴-۱- وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب مخلوط بتنی با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال ۸۱
جدول۴-۲- وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب مخلوط بتنی با مقاومت ۳۸ مگاپاسکال ۸۱
جدول۴-۳- وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب مخلوط بتنی با مقاومت ۶۸ مگاپاسکال ۸۱
جدول۴-۴- متوسط مشخصات مکانیکی میلگردهای فولادی با قطر ۱۰ میلی‌متر ۸۲
جدول۴-۵- مشخصات مکانیکی میلگردهای GFRP ۸۴
جدول۴-۶- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی بدون وصله (دسته اول) ۸۶
جدول۴-۷- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی وصله‌دار (دسته دوم) ۸۶
جدول۴-۸- گام‌های بارگذاری استاتیکی نمونه‌ها ۹۱

فصل پنجم: خیز و مقاومت پیوستگی تیرهای مسلح شده با میلگردهای FRP

جدول۵-۱- داده‌های آزمایشگاهی خیز تیرهای مسلح شده با میلگردهای FRP ۱۰۳
جدول۵-۲- دامنه تغییرات پارامترها در داده‌های آزمایشگاهی ۱۰۴
جدول۵-۳- پاسخ‌های بهینه‌یابی برای مدل‌های I و II ۱۰۷
جدول۵-۴- خلاصه مقادیر بار در حد سرویس و حد نهایی ۱۱۰
جدول۵-۵- مقایسه آماری نتایج خیز روش‌های مختلف تحلیلی با خیز تجربی ۱۱۵
جدول۵-۶- شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۲۱

جدول۵-۷- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی تیرهای وصله شده با میلگردهای FRP ۱۳۰
جدول۵-۸- مقایسه مقاومت پیوستگی محاسباتی با مقادیرتجربی ۱۳۲
جدول۵-۹- مقادیرمیانگین وانحراف از معیار سری‌های مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۳۴

فصل ششم: بررسی خسارت از روی داده‌های آزمایش مودال

جدول۶-۱- متوسط ممان اینرسی تخمین زده شده (m^4) ۱۵۳

پیوست الف

جدول (الف-۱)- فرکانس‌های تیر B1 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۶
جدول (الف-۲)- فرکانس‌های تیر B2 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۶
جدول (الف-۳)- فرکانس‌های تیر B3 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۶
جدول (الف-۴)- فرکانس‌های تیر B4 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۷
جدول (الف-۵)- فرکانس‌های تیر B5 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۷
جدول (الف-۶)- فرکانس‌های تیر B6 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۷
جدول (الف-۷)- فرکانس‌های تیر B7 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۷
جدول (الف-۸)- فرکانس‌های تیر B8 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۸
جدول (الف-۹)- فرکانس‌های تیر B9 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۸
جدول (الف-۱۰)- فرکانس‌های تیر B10 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۸
جدول (الف-۱۱)- فرکانس‌های تیر B11 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۸
جدول (الف-۱۲)- فرکانس‌های تیر B12 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۹
جدول (الف-۱۳)- فرکانس‌های تیر B13 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۹
جدول (الف-۱۴)- فرکانس‌های تیر B14 برحسب هرتز(Hz) ۱۷۹