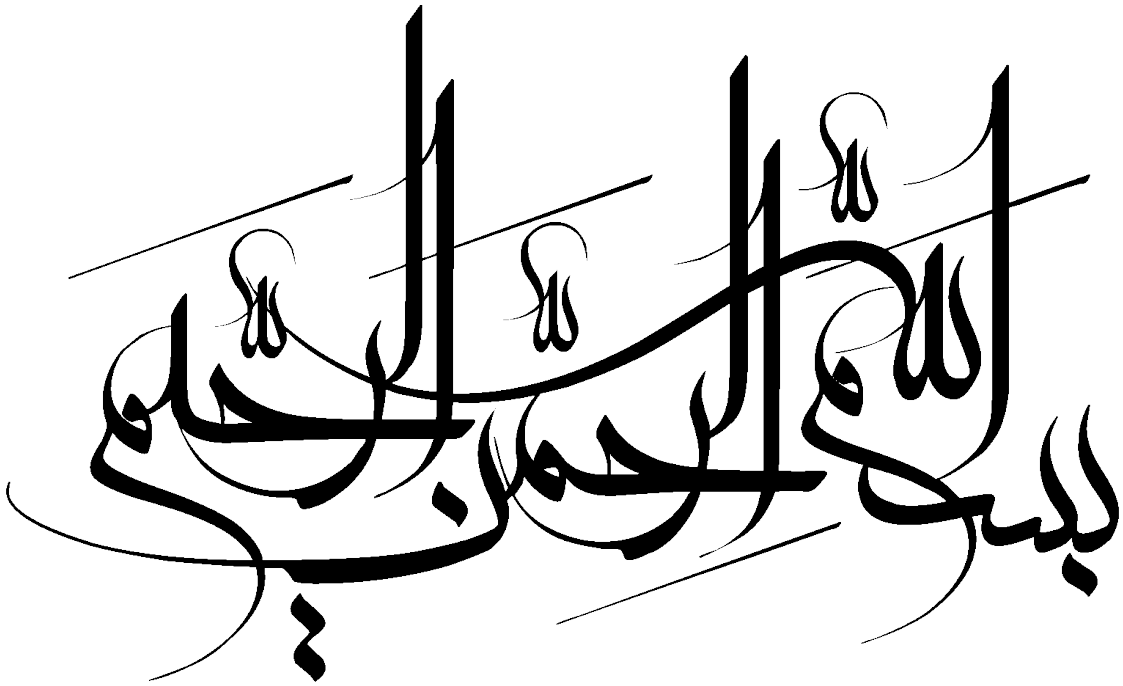
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده عمران و معماری

گروه مهندسی عمران

بررسی رفتار تیرهای بتن‌آرمه مقاوم‌شده با پلیمرهای مسلح به الیاف هیبریدی (Hybrid FRP)

دانشجو: بهمن چای‌چی مطلق

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر فرشید جندقی علایی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اردیبهشت ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : عمران و معماری

گروه : مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای بهمن چای چی مطلق

تحت عنوان:

بررسی رفتار تیرهای بتن‌آرمه مقاوم‌شده با پلیمرهای مسلح به الیاف هیبریدی (Hybrid FRP)

در تاریخ ۱۳۹۳/۴/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : فرشید جندقی علایی		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : وحیدرضا کلات‌جاری		نام و نام خانوادگی : مهدی گلی	
نام و نام خانوادگی : مهدی توکلی			

تقدیم به:

پدر و مادرم

که با زحمات بی‌دریغشان دشواری‌های زندگی را برای من سهل نمودند و دعای خیرشان توشه راهم بود.

تشکر و قدردانی:

در ابتدا لازم می‌دانم از راهنمایی‌های جناب آقای دکتر فرشید جندقی‌علایی و زحمات کلیه افرادی که در هدایت و تکمیل این مجموعه مرا راهنمایی کرده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم، موفقیت روزافزون ایشان را از خداوند متعال خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب بهمن چای‌چی مطلق دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی رفتار تیرهای بتن‌آرمه مقاوم‌شده با پلیمرهای مسلح به الیاف هیبریدی (Hybrid FRP) تحت راهنمائی جناب آقای دکتر فرشید جندقی علایی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.
- **تاریخ**

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) یکی از پرکاربردترین روش‌های مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح می‌باشد. کاربری آسان مواد FRP به علت داشتن وزن کم، مقاومت کششی بالا و عدم خوردگی باعث شده است که این مواد جایگزین مناسبی برای مصالح سنتی و شیوه‌های متعارف موجود باشند.

طی سال‌های اخیر مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از چسباندن ورق‌های FRP به سطح خارجی آن‌ها، از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است. با این وجود به دلیل رفتار خطی تنش-کرنش FRP تا حد گسیختگی و نبود سطح جاری‌شدگی، شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح مقاوم‌شده با FRP کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت. استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف هیبریدی (Hybrid FRP) از راهکارهای پیشنهاد شده برای مقابله با شکل‌پذیری کم تیرهای بتن‌آرمه مقاوم‌شده است.

در این پایان‌نامه سعی شده است تا با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح مقاوم‌شده با ورق‌های Hybrid FRP مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در ادامه مدلی برای پیش‌بینی پاسخ بار-تغییر مکان و مد گسیختگی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده ارائه می‌گردد. نتایج هر دو تحلیل نشان می‌دهد که استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف هیبریدی در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح مقاوم‌شده مؤثر می‌باشد.

واژگان کلیدی: تیر بتن مسلح، مقاوم‌سازی، ورق Hybrid FR، تحلیل اجزای محدود، شکل‌پذیری، مدل تحلیلی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- انواع الیاف ۳

۱-۲-۱- الیاف شیشه ۴

۱-۲-۲- الیاف کربن ۵

۱-۲-۳- الیاف آرامید ۶

۱-۳- انواع محصولات HYBRID FRP ۷

۱-۴- مشخصات اساسی مصالح کامپوزیت HYBRID FRP ۸

۱-۴-۱- مقاومت در برابر خوردگی ۸

۱-۴-۲- مقاومت کششی ۹

۱-۴-۳- مدول الاستیسیته ۹

۱-۴-۴- وزن مخصوص ۹

۱-۴-۵- عایق بودن ۱۰

۱-۴-۶- خستگی ۱۰

۱-۴-۸- چسبندگی با بتن ۱۰

۱-۴-۹- خم شدن ۱۱

۱-۴-۱۰- دوام کامپوزیت‌های FRP ۱۱

۱-۴-۱۱- رفتار تنش-کرنش کامپوزیت‌های HYBRID FRP ۱۲

فصل دوم- مروری بر مقالات پیشین ۱۵

۲-۱- مقدمه ۱۶

۲-۲- بررسی‌های آزمایشگاهی ۱۶
۲-۲-۱- آزمایش‌های وو و همکارانش ۱۶
۲-۲-۲- آزمایش‌های گریس و همکارانش ۱۷
۲-۲-۳- آزمایش‌های حُسنی و همکارانش ۱۹
۲-۲-۴- آزمایش‌های ایواشیتا و همکارانش ۲۰
۲-۲-۵- آزمایش‌های اکبرزاده و مقصودی ۲۱
۲-۲-۶- آزمایش‌های کیم و شین ۲۲
۲-۲-۷- آزمایش‌های چوی و همکارانش ۲۳
فصل سوم- روابط حاکم بر مدل‌سازی ۲۷
۳-۱- پیش درآمدی بر روش اجزای محدود ۲۸
۳-۲- مبانی نظری در تحلیل غیرخطی ۳۰
۳-۲-۱- منشأ رفتار غیرخطی در سازه‌ها ۳۰
۳-۲-۱-۱- مصالح غیرخطی ۳۱
۳-۲-۱-۲- شرایط مرزی (تکیه‌گاهی) غیرخطی ۳۱
۳-۲-۱-۳- هندسه غیر خطی ۳۲
۳-۲-۲- حل مسائل غیرخطی ۳۳
۳-۲-۳- همگرایی ۳۴
۳-۳- بررسی مدل‌های رفتاری مصالح ۳۶
۳-۳-۱- رفتار غیرخطی بتن ۳۶
۳-۳-۲- رفتار بتن ترک خورده در کشش ۳۸
۳-۳-۲-۱- مقاومت کششی بتن ۳۹
۳-۳-۲-۲- فاصله ترک‌ها در المان‌های تسلیح شده با آرماتورهای فولادی ۴۰

۳-۳-۲-۳- سخت شدگی کششی ۴۳
۳-۳-۲-۳-۱- مدل ووکیو و کالینز ۴۷
۳-۳-۲-۳-۲- مدل کالینز و میشل ۴۸
۳-۳-۲-۳-۳- مدل شیما و همکارانش ۴۸
۳-۳-۳- رفتار تک محوری بتن در فشار ۴۹
۳-۳-۳-۱- هذلولی هاگنستاد ۴۹
۳-۳-۳-۲- منحنی پایه پوپویک ۵۰
۳-۳-۳-۳- مدل فشاری مایکاوا ۵۱
۳-۳-۳-۴- مدل مندر و همکارانش ۵۲
۳-۳-۴- رفتار فولاد ۵۳
۳-۴- مدل‌سازی رفتار مصالح در نرم‌افزار ۵۶
۳-۴-۱- بتن ۵۷
۳-۴-۱-۱- روش ترک پخشی ۵۷
۳-۴-۱-۱-۱- مدل ترک‌پخشی چرخشی ۵۸
۳-۴-۱-۱-۲- مدل ترک پخشی ثابت ۵۸
۳-۴-۱-۲- مدل آسیب‌دیدگی پلاستیک بتن ۵۹
۳-۴-۱-۲-۱- رابطه تنش-کرنش ۶۰
۳-۴-۱-۲-۲- متغیرهای سخت‌شوندگی ۶۰
۳-۴-۱-۲-۳- تابع تسلیم ۶۱
۳-۴-۱-۲-۴- قانون جریان ۶۱
۳-۴-۱-۲-۵- آسیب‌دیدگی و کاهش سختی برای بارگذاری تک‌محوری ۶۱
۳-۴-۱-۲-۶- آسیب‌دیدگی و کاهش سختی برای بارگذاری تناوبی‌تک‌محوری ۶۴
۳-۴-۱-۲-۷- آسیب‌دیدگی و کاهش سختی برای بارگذاری چند محوری ۶۵

۳-۴-۱-۲-۸- معیار تسلیم ۶۷
۳-۴-۱-۲-۹- پتانسیل جریان ۶۹
۳-۴-۲- فولاد ۷۰
۳-۴-۳- ورق‌های FRP ۷۰
۳-۵- مشخصات المان‌ها در نرم‌افزار ABAQUS ۷۱
۳-۵-۱- خانواده المان ۷۱
۳-۵-۲- درجات آزادی ۷۲
۳-۵-۳- تعداد گره‌ها و مرتبه درون‌یابی ۷۲
۳-۵-۴- فرمولاسیون ۷۳
فصل چهارم- بررسی صحت مدل‌سازی ۷۵
۴-۱- مقدمه ۷۶
۴-۲- مدل‌سازی تیر تقویت شده در ABAQUS ۷۶
۴-۲-۱- نحوه مدل‌سازی یک عضو سازه‌ای در ABAQUS ۷۶
۴-۳- مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی ۷۸
۴-۳-۱- مشخصات مصالح ۷۹
۴-۳-۲- بارگذاری ۸۰
۴-۳-۳- مدل‌سازی رفتار مصالح ۸۰
۴-۳-۳-۱- بتن ۸۰
۴-۳-۳-۲- فولاد ۸۳
۴-۳-۳-۳- صفحه تکیه‌گاهی ۸۴
۴-۳-۳-۳- ورق HYBRID FRP ۸۴
۴-۳-۴- انواع المان‌های مورد استفاده ۸۶

۴-۳-۴-۱- بتن ۸۶
۴-۳-۴-۲- فولاد ۸۶
۵-۳-۴-۳- صفحه تکیه گاهی ۸۷
۴-۳-۵- شبکه‌بندی مدل ۸۷
۴-۳-۶- ارتباط بین مصالح سازنده مدل ۸۸
۴-۳-۷- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی ۸۹
۴-۳-۸- روش تحلیل ۹۰
۴-۳-۹- بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود ۹۰
۴-۵- تحلیل حساسیت ۹۳
۴-۵-۱- بررسی حساسیت به شبکه‌بندی ۹۴
۴-۵-۲- بررسی حساسیت به زاویه اتساع ۹۴
۴-۵-۳- بررسی تأثیر المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی آرماتورها ۹۵
۴-۵-۴- بررسی حساسیت به مدل‌های رفتاری آرماتور ۹۶
۴-۵-۴- بررسی حساسیت به مدل‌های رفتارفشاری بتن ۹۶
۴-۵-۵- بررسی حساسیت به مدل‌های رفتار کششی بتن ۹۷
فصل پنجم- معرفی مدل تحلیلی ۹۹
۵-۱- مقدمه ۱۰۰
۵-۲- مدل‌های مربوط به تحلیل تیرهای تحت خمش ۱۰۱
۵-۲-۱- بتن فشاری ۱۰۳
۵-۲-۲- بتن کششی ۱۰۵
۵-۲-۳- بتن ترک‌خورده ۱۰۷
۵-۲-۴- آرماتورهای کششی و فشاری ۱۱۱

۵-۲-۵- ورق HYBRID FRP ۱۱۲
۵-۲-۶- نحوه محاسبه تغییر مکان در وسط دهانه تیر ۱۱۳
۵-۳- مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی ۱۱۶
۵-۳-۱- پاسخ لنگر- انحنای تیر ۱۱۷
۵-۳-۲-پاسخ بار-تغییر مکان وسط دهانه تیر ۱۱۸
۵-۳-۳- شکل‌پذیری ۱۱۸
۵-۳-۴- رفتار مصالح ۱۱۹
فصل ششم- مطالعات رفتاری و تحلیل پارامتری ۱۲۱
۶-۱- مقدمه ۱۲۲
۶-۲- مشخصات تیرهای تحلیل شده ۱۲۳
۶-۳- بررسی اثر نسبت آرماتورهای کششی تیر بتن مسلح ۱۲۴
۶-۳-۱- رفتار بار-تغییر مکان ۱۲۴
۶-۳-۲- بار گسیختگی تیرها ۱۲۵
۶-۳-۳- رفتار مصالح ۱۲۶
۶-۳-۴- شکل‌پذیری ۱۲۸
۶-۳-۵- الگوی ترک‌خوردگی تیرها ۱۲۸
۶-۴- بررسی اثر مقاومت بتن ۱۲۹
۶-۴-۱- رفتار بار-تغییر مکان ۱۳۰
۶-۴-۲- بار گسیختگی تیرها ۱۳۰
۶-۴-۳- رفتار مصالح ۱۳۱
۶-۴-۴- شکل‌پذیری ۱۳۳
۶-۴-۵- الگوی ترک‌خوردگی تیرها ۱۳۳

۶-۵- بررسی اثر ضخامت لایه‌های ورق‌تقویت ۱۳۴
۶-۵-۱- رفتار بار-تغییر مکان ۱۳۴
۶-۵-۲- بار گسیختگی تیرها ۱۳۵
۶-۵-۳- رفتار مصالح ۱۳۶
۶-۵-۴- شکل‌پذیری ۱۳۸
۶-۵-۵- الگوی ترک‌خوردگی تیرها ۱۳۸
۶-۶- بررسی اثر هیبریدی ورق تقویت ۱۳۹
۶-۶-۱- رفتار بار-تغییر مکان ۱۳۹
۶-۶-۲- بار گسیختگی تیرها ۱۴۰
۶-۶-۳- رفتار مصالح ۱۴۱
۶-۶-۴- شکل‌پذیری ۱۴۲
۶-۶-۵- الگوی ترک‌خوردگی تیرها ۱۴۳
۶-۷- بررسی اثر جنس مصالح تشکیل‌دهنده ورق تقویت ۱۴۳
۶-۷-۱- رفتار بار-تغییر مکان ۱۴۵
۶-۷-۲- بار گسیختگی تیرها ۱۴۶
۶-۶-۳- رفتار مصالح ۱۴۶
۶-۶-۴- شکل‌پذیری ۱۴۸
فصل هفتم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۴۹
۷-۱- مقدمه ۱۵۰
۷-۲- نتیجه‌گیری ۱۵۰
۷-۳- پیشنهادات ۱۵۳
پیوست ۱۵۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱- ساختار مصالح FRP در سطح میکرومکانیک ۲

شکل ۱-۲- دیاگرام تنش-کرنش HYBRID FRP متشکل از دو نوع الیاف ۱۲

شکل ۲-۱- نتایج آزمایش کشش بر روی ورق‌های کامپوزیت در آزمایش وو و همکارانش ۱۷

شکل ۲-۲- الیاف استفاده شده در آزمایش گریس و همکارانش ۱۸

شکل ۲-۳- رفتار کششی الیاف HYBRID FRP متشکل از دو نوع الیاف ۲۰

شکل ۲-۴- جزییات تیرهای استفاده شده در آزمایش چوی و همکارانش ۲۴

شکل ۳-۱- منحنی تنش-کرنش برای یک ماده الاستوپلاستیک تحت کشش تک محوری ۳۱

شکل۳-۲- تیر طره با تغییر در شرایط تکیه‌گاهی ۳۲

شکل ۳-۳- تغییر شکل زیاد انتهای آزاد تیر طره ۳۲

شکل ۳-۴- منحنی غیر خطی بار-تغییر مکان ۳۳

شکل ۳-۵- روش حل نیوتن-رافسون ۳۴

شکل ۳-۶- نیروهای داخلی و خارجی وارد بر یک جسم ۳۴

شکل ۳-۷- اولین تکرار در یک نمو ۳۵

شکل ۴-۸- تکرار دوم نیوتن-رافسون ۳۶

شکل ۴-۹- نمودار تنش-کرنش بتن در (الف) کشش، (ب) فشار ۳۷

شکل ۴-۱۰- گسترش تنش در بتن ترک خورده ۴۱

شکل ۴-۱۱- اثر سخت‌شدگی کششی بر رفتار تغییر شکل بتن مسلح ۴۴

شکل ۴-۱۲- مدل کردن اثر سخت‌شدگی به وسیله گیلبرت و وارنر (۱۹۷۸) ۴۵

شکل ۴-۱۳- رابطه تنش-کرنش فولاد در بتن طبق آیین نامه CEB-FIP ۴۶

شکل ۴-۱۴- رابطه تنش-کرنش بتن در کشش به وسیله ووکیو و کالینز (۱۹۸۶) ۴۸

شکل ۴-۱۵- مدل فشاری هاگنستاد ۵۰
شکل ۴-۱۶- مدل فشاری پوپویک ۵۰
شکل ۴-۱۷- مدل فشاری مایکاوا ۵۱
شکل ۴-۱۸- مدل تنش-کرنش پیشنهاد شده برای بتن محصور و غیرمحصور تحت بارگذاری یکنوا ۵۳
شکل ۴-۱۹- مدل رفتار متوسط فولاد ۵۴
شکل ۴-۲۰- مدل چندخطی سالم و مایکاوا ۵۵
شکل ۴-۲۱- منحنی شماتیک تنش-کرنش تحت کشش تک محوری ۶۳
شکل ۴-۲۲- منحنی شماتیک تنش-کرنش در فشار تک محوری ۶۳
شکل ۴-۲۳- تأثیر فاکتورهای وزنی در بازیابی سختی فشاری ۶۵
شکل ۴-۲۴- سطح تسلیم بارسلونا در حالت تنش دو محوری ۶۷
شکل ۴-۲۵- نمونه‌ای از سطح تسلیم مطابق با مقادیر مختلف $\boldsymbol{KC}$ ۶۹
شکل ۴-۲۶- رفتار تنش-کرنش ورق‌های FRP ۷۰
شکل ۴-۲۷- خانواده المان‌های رایج ۷۱
شکل ۴-۲۸- المان‌های آجری خطی و آجری مرتبه دوم ۷۳
شکل ۴-۱- ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری تیر بتن مسلح RCB-2C1C7-D13 ..... ۷۹
شکل ۴-۲- وضعیت بارگذاری ۸۰
شکل ۴-۳- منحنی تنش-کرنش استفاده شده در مدل‌سازی برای بتن فشاری ۸۱
شکل ۴-۴- منحنی تنش-کرنش استفاده شده در مدل‌سازی برای بتن کششی ۸۱
شکل ۴-۵- مدل الاستیک - سخت‌شدگی خطی برای فولاد ۸۴
شکل ۴-۶- مدل دو خطی رفتار تنش-کرنش ورق HYBRID FRP ۸۵
شکل ۴-۷- مقایسه مدل دو خطی فرض شده برای رفتار تنش-کرنش ورق HYBRID FRP با نتایج آزمایش کششی ۸۶
شکل ۴-۸- نقاط انتگرال گیری در المان T3D2 ..... ۸۶

شکل ۴-۹- شکل و نقاط انتگرال‌گیری المان S4R ۸۷
شکل ۴-۱۰- شبکه بندی تیر بتن مسلح ۸۸
شکل ۴-۱۱- بارگذاری و شرایط مرزی اعمال شده در مدل‌سازی ۹۰
شکل ۴-۱۲- منحنی بار-تغییر مکان تیر بتن مسلح تقویت نشده ۹۰
شکل ۴-۱۳- منحنی بار-کرنش (الف): بتن فشاری، (ب): فولاد کششی، (ج): ورق HYBRID FRP در مدل اجزای محدود ۹۲
شکل ۴-۱۴- نمایش الگوی ترک‌خوردگی تیر کنترل در مدل اجزای محدود ۹۲
شکل ۴-۱۵- بررسی حساسیت به شبکه‌بندی ۹۴
شکل ۴-۱۶- بررسی حساسیت به زاویه اتساع ۹۵
شکل ۴-۱۷- بررسی تأثیر المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی آرماتورهای فولادی ۹۵
شکل ۴-۱۸- بررسی تأثیر مدل‌های رفتاری مختلف آرماتور ۹۶
شکل ۴-۲۶- بررسی حساسیت به مدل‌های رفتار فشاری بتن ۹۷
شکل ۴-۲۰- بررسی حساسیت به مدل‌های رفتار کششی بتن ۹۷
شکل ۵-۱- فلوچارت برنامه تحلیل تیرهای مقاوم‌شده ۱۰۴
شکل ۵-۲- دیاگرام تنش-کرنش برای بتن تحت فشار ۱۰۳
شکل ۵-۳- دیاگرام تنش-کرنش برای بتن تحت کشش تک محوری ۱۰۶
شکل ۵-۴- توزیع تنش و کرنش تیر مقاوم شده با FRP در امتداد مقطع تیر ۱۰۷
شکل ۵-۵- دیاگرام تنش-عرض ترک برای بتن ترک‌خورده ۱۰۸
شکل ۵-۶- دیاگرام‌های حقیقی تنش-کرنش برای آرماتورهای فولادی ۱۱۱
شکل۵-۷- دیاگرام ایده‌آل تنش-کرنش برای آرماتورهای فولادی ۱۱۲
شکل ۵-۸- دیاگرام فرض شده برای رفتار تنش-کرنش ورق 2C1C7 در آزمایش وو و همکارانش ۱۱۳
شکل ۵-۹- نمایش پارامترها در بارگذاری چهار نقطه‌ای ۱۱۳
شکل ۵-۱۰- نحوه محاسبه انحناء با داشتن عمق تار خنثی و کرنش تار فشاری ۱۱۴

شکل ۵-۱۱- نحوه محاسبه تغییر مکان در وسط تیر ۱۱۶
شکل ۵-۱۲- رفتار لنگر-انحنای تیر RCB-2C1C7-D13 در مدل ارائه شده ۱۱۷
شکل ۵-۱۳- رفتار بار-تغییر مکان تیر RCB-2C1C7-D13 در مدل ارائه شده ۱۱۸
شکل ۵-۱۴- منحنی بار-کرنش (الف): بتن فشاری، (ب): آرماتور کششی، (ج): ورق HYBRID FRP در مدل تحلیل تیر ۱۲۰
شکل ۶-۱-موقعیت تکیه‌گاهی و محل اعمال بارگذاری در تیرهای تحلیل شده ۱۲۳
شکل ۶-۲- جزییات خاموت‌گذاری و ابعاد هندسی تیرهای بتن مسلح تحلیل شده ۱۲۴
شکل ۶-۳- مقایسه اثر نسبت آرماتورهای کششی بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل اجزای محدود ۱۲۵
شکل ۶-۴- مقایسه اثر نسبت آرماتورهای کششی بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل تحلیلی ۱۲۵
شکل ۶-۵- رفتار بار-کرنش در بتن فشاری و ورق HYBRID FRP در تیرهای (الف): BEAM-R-0.65، (ب): BEAM-R-0.94، (ج): BEAM-R-1.11، (د): BEAM-R-1.68 ..... ۱۲۷
شکل ۶-۶- الگوی ترک‌خوردگی تیر (الف): BEAM-R-0.65 ، (ب): BEAM-R-0.94،(ج): BEAM-R-1.11، (د): BEAM-R-1.68 ..... ۱۲۹
شکل ۶-۸- مقایسه اثر مقاومت فشاری بتن بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل تحلیلی ۱۳۰
شکل ۶-۹- رفتار بار-کرنش در بتن فشاری و ورق HYBRID FRP در تیرهای (الف): BEAM-C-25،(ب): BEAM-C-30، (ج): BEAM-C-35، (د): BEAM-C-40 ..... ۱۳۲
شکل ۶-۱۰- الگوی ترک‌خوردگی تیر (الف): BEAM-C-25 ، (ب): BEAM-C-30، ۱۳۳
(ج): BEAM-C-35، (د): BEAM-C-40 ..... ۱۳۳
شکل ۶-۱۱- مقایسه اثر مقاومت فشاری بتن بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل اجزای محدود..... ۱۳۵
شکل ۶-۱۲- مقایسه اثر مقاومت فشاری بتن بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل تحلیلی..... ۱۳۵
شکل ۶-۱۳- رفتار بار-کرنش در بتن فشاری و ورق HYBRID FRP در تیرهای (الف): BEAM-0.8C1+0.2C7 ..... ۱۳۷
(ب): BEAM-0.6C1+0.4C7، (ج): BEAM-0.4C1+0.6C7، (د): BEAM-0.2C1+0.8C7..... ۱۳۷
شکل ۶-۱۴- الگوی ترک‌خوردگی تیر (الف): BEAM-0.2C1+0.8C7، (ب): BEAM-0.4C1+0.6C7،۱۳۹

(ج): BEAM-0.6C1+0.4C7، (د): BEAM-0.8C1+0.2C7 ..... ۱۳۹
شکل ۶-۱۵- مقایسه اثر نوع ورق تقویت بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل اجزای محدود ۱۴۰
شکل ۶-۱۶- مقایسه اثر نوع ورق تقویت بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل تحلیلی ۱۴۰
شکل ۶-۱۷- رفتار بار-کرنش در بتن فشاری و ورق HYBRID FRP در تیرهای (الف): BEAM-C1 ۱۴۲
(ب): BEAMC7، (ج): BEAM-C1C7 ..... ۱۴۲
شکل ۶-۱۸- الگوی ترک‌خوردگی تیر (الف): BEAM-C1، (ب): BEAM-C7، (ج): BEAM-C1C7 ۱۴۳
شکل ۶-۱۹- جزییات خاموت‌گذاری و ابعاد هندسی تیرهای بتن مسلح تحلیل شده ۱۴۵
شکل ۶-۲۰- مقایسه اثر جنس مصالح ورق تقویت بر رفتار بار-تغییر مکان در مدل تحلیلی..... ۱۴۵
شکل ۶-۲۱- رفتار بار-کرنش در بتن فشاری و ورق HYBRID FRP در تیرهای (الف): BEAM-
COMB1 ، (ب): BEAM-COMB2، (ج): BEAM-COMB3، (د): BEAM-COMB4 ..... ۱۴۸
شکل ۷-۱- مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌های با نسبت آرماتور کششی متفاوت ۱۵۱
شکل ۷-۲- مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌های با مقاومت فشاری متفاوت ۱۵۱
شکل ۷-۳- مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌های با نسبت‌های حجمی متفاوت لایه‌های ورق تقویت..... ۱۵۲
شکل ۷-۴- مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌های با نوع ورق تقویت متفاوت ۱۵۲
شکل ۷-۵- مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌های با جنس مصالح ورق تقویت متفاوت ۱۵۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱- مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی ۷۹

جدول ۴-۲- مشخصات ورق‌های تقویت ۷۹

جدول ۴-۳- مقادیر مربوط به مدل‌سازی رفتار خطی بتن (پارامترهای الاستیک بتن) ۸۲

جدول ۴-۴- پارامترهای پلاستیسیته مدل CDP ۸۲

جدول ۴-۷- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مورد استفاده در تیر RCB-2C1C7-D13 ..... ۸۳

جدول ۴-۸- داده‌های ورودی رفتار پلاستیک آرماتورهای فولادی مورد استفاده در تیر RCB-2C1C7-D13 ..... ۸۳

جدول ۴-۹- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون صفحه تکیه‌گاه تیر RCB-2C1C7-D13 ..... ۸۴

جدول ۴-۱۰- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ورق HYBRID FRP ۸۵

جدول ۴-۱۱- داده‌های ورودی رفتار پلاستیک ورق HYBRID FRP ۸۵

جدول ۴-۱۲- انواع المان‌های انتخاب شده برای مدل‌سازی تیر تقویت‌شده ۸۷

جدول ۴-۱۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود تیر RCB-2C1C7-D13 ..... ۹۱

جدول ۴-۱۲- شکل‌پذیری در مدل اجزای محدود ۹۳

جدول ۵-۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل تحلیل تیر RCB-2C1C7-D13 ..... ۱۱۸

جدول ۵-۲- شکل‌پذیری در مدل تحلیل تیر ۱۱۹

جدول ۶-۱- نام و مشخصات نمونه‌های مدل‌شده برای بررسی اثر نسبت آرماتورهای کششی ۱۲۴

جدول ۶-۲- بارهای نهایی مربوط به تیرهای با نسبت آرماتور کششی متفاوت ۱۲۶

جدول ۶-۳- بررسی شکل‌پذیری در تیرهای با نسبت آرماتور کششی متفاوت ۱۲۸

جدول ۶-۴- مشخصات مکانیکی بتن در تیرهای با مقاومت فشاری بتن متفاوت ۱۲۹

جدول ۶-۵- بارهای نهایی مربوط به تیرهای با مقاومت فشاری بتن متفاوت ۱۳۱

جدول ۶-۶- بررسی شکل‌پذیری در تیرهای با مقاومت فشاری بتن متفاوت ۱۳۳