وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین المللی امام خمینی

IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی و مهندسی

مطالعه تاثیر مقاومت بتن و چسبندگی FRPهای انعطاف پذیر بر مقاومت نهایی تیرها و ستون های دورپیچ شده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی عمران گرایش سازه

علی خونساری

استاد راهنما:

دکتر محمود نادری

آذر ۱۳۹۱

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین المللی امام خمینی

IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

مطالعه تاثیر مقاومت بتن و چسبندگی FRPهای انعطاف پذیر بر مقاومت نهایی تیرها و ستون های دورپیچ شده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی عمران

گرایش سازه

علی خونساری

استاد راهنما:

دکتر محمود نادری

آذر ۱۳۹۱

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی یاور و پشتیبانم بوده اند.

با تشکر از:

استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر محمود نادری که با راهنمایی های ارزنده و تجربه های علمی منحصر به فردشان در تمام مراحل پژوهش مشوق و یاور اینجانب بوده اند.

دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

معاونت آموزشی – مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۳۰

فرم تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان نامه ارشد

بدین وسیله گواهی میشود جلسه دفاعیه از پایان نامه کارشناسی ارشد/ دکتری ..... علی خوشنویس .....

دانشجوی رشته ..... عمران ..... گرایش ..... سازه ..... تحت عنوان ..... مقایسه تأثیر مقاومت تنش و خستگی FRP های انعطاف پذیر بر مقاومت های تیرها و ستون های بتنی (در پیوند چسبنده) .....

در تاریخ ۱۴۰۱/۹/۲۹ در دانشگاه برگزار گردید و این پایان نامه با نمره ..... ۲۰ ..... و درجه ..... عالی ..... مورد تایید هیئت داوران قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه‌ی دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	هیئت علمی دانشگاه	دکتر محمود نادری	دانشیار	دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)	
۲	"	دکتر خزانه خاکزار	استادیار	"	فرم نامه
۳	"	دکتر مسعود تاسوجی نوری	استادیار	"	
۴	———	—	—	—	—
۵					

دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

معاونت آموزشی دانشگاه- مدیریت تحصیلات تکمیلی

(فرم شماره ۲۶)

تعهد نامه اصالت پایان نامه

اینجانب **علی خونساری** دانشجوی رشته **مهندسی سازه** مقطع تحصیلی **کارشناسی ارشد** بدین وسیله اصالت کلیه مطالب موجود در مباحث مطروحه در پایان نامه تحصیلی خود، با عنوان **مطالعه تاثیر مقاومت بتن و چسبندگی FRPهای انعطاف پذیر بر مقاومت نهایی تیرها و ستون های دورپیچ شده** را تأیید کرده، اعلام می نمایم که تمامی محتوی آن حاصل مطالعه ، پژوهش و تدوین خودم بوده و به هیچ وجه رونویسی از پایان نامه و یا هیچ اثر یا منبع دیگری، اعم از داخلی، خارجی و یا بین المللی، نبوده و تعهد می نمایم در صورت اثبات عدم اصالت آن و یا احراز عدم صحت مفاد و یا لوازم این تعهد نامه در هر مرحله از مراحل منتهی به فارغ التحصیلی و یا پس از آن و یا تحصیل در مقاطع دیگر و یا اشتغال و ... دانشگاه حق دارد ضمن رد پایان نامه نسبت به لغو و ابطال مدرک تحصیلی مربوطه اقدام نماید. مضافاً اینکه کلیه مسئولیت ها و پیامدهای قانونی و یا خسارت وارده از هر حیث متوجه اینجانب می باشد.

علی خونساری

امضاء و تاریخ

مجوز بهره برداری از پایان نامه/ رساله

کلیه حقوق اعم از چاپ، تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و ... از نتایج این پایان نامه برای دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) قزوین محفوظ است. بهره بـرداری از این پایان نامه/ رساله در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه بـه محـدودیتی کـه توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می شود، بلامانع است:

☐ بهره برداری از این پایان نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره برداری از این پایان نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلا مانع است.

☐ بهره برداری از این پایان نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

استاد راهنما می تواند یکی از گزینه های بالا را انتخاب کند و مسـئولین کتابخانـه موظـف بـه رعایـت موارد تعیین شده می باشد.

نام استاد و یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضاء:

چکیده

سازه های بتنی فراوانی وجود دارند که به دلایل گوناگون نیاز به مقاوم سازی دارند. در میان روش های مختلف مقاوم سازی استفاده از ورق های پلیمری مسلح به الیاف FRP به عنوان روشی کارآمد و بهینه با استقبال رو به رشدی مواجه بوده است. با توجه به اینکه در سیستم های مقاوم سازی با FRP، مقاومت سطحی بتن بستر تاثیر تعیین کننده ای بر اتصال و چسبندگی بین FRP و بتن دارد، در این تحقیقات، مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی بیست نمونه تیر بتنی و بیست نمونه ستون بتنی ساخته شده از پنج مقاومت مختلف بتن به انجام رسیده است. نیمی از نمونه های یاد شده با CFRP های انعطاف پذیر مقاوم سازی شده اند و نیمی دیگر بعنوان شاهد مورد استفاده قرار گرفته اند. تیرها به صورت سه وجهی و ستون ها به صورت دورپیچ با ورق های پلیمری مسلح به الیاف کربنی تک سویه CFRP مقاوم سازی شده اند. مقاومت سطحی بتن نمونه ها و وضعیت چسبندگیCFRP به بستر بتنی با استفاده از روش "پیچش" اندازه گیری و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از شکست نمونه ها در آزمایش های استاندارد خمشی و فشاری مقایسه گردیده اند. در نهایت میزان اهمیت و تاثیر مقاومت سطحی بتن و مقاومت چسبندگی CFRP به بتن، بدست آمده از روش "پیچش" در رفتار تیرها و ستون های بتنی که با ورق های FRP تقویت شده اند ارائه شده است.

کلمات کلیدی: آزمون "پیچش"، مقاومت بتن، تیر بتنی، ستون بتنی، چسبندگی،CFRP

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ اهداف مطالعه ٤

۲- فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع ۸

۲-۱-۲- خطاهای اجرایی ۹

۲-۱-۳- افزایش بار سازه ۹

۲-۱-٤- تغییرات بار سازه ۹

۲-۱-۵- نیازمندی به تحمل بارهای جدید ۹

۲-۱-٦- تغییرات آیین نامه ای ۹

۲-۱-۷- شناخت بهتر نیروهای زلزله نسبت به گذشته ۹

۲-۱-۸- تأثیر شرایط محیطی مخرب ۱۰

۲-۱-۹- آسیب دیدگی سازه ها ناشی از حوادث ضربه، آتش سوزی، باد و زلزله ۱۰

۲-۲- سیستم کامپوزیت FRP ۱۱

۲-۲-۱- تاریخچه توسعه و شکل گیری FRP ۱۲

۲-۲-۲- مزایای FRP ۱۳

۲-۲-۳- اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت FRP ۱۳

۲-۲-٤- روش های ساخت کامپوزیت FRP ۱٤

۲-۲-۵- خصوصیات فیزیکی FRP ۱٦

۲-۲-٦- رزین ها ۱۷

۲-۲-۷- مقایسه عملکرد انواع کامپوزیت ها در سازه های بتنی ۱۸

۲-۳- انتخاب نوع سیستم FRP ۱۸

۲-۳-۱- ملاحظات محیطی ۱۹

۲-۳-۲- محیط قلیایی یا اسیدی ۱۹

۲-۳-۳- انبساط حرارتی ۱۹
۲-۳-٤- رسانایی الکتریکی ۲۰
۲-۳-٥- ملاحظات بارگذاری ۲۰
۲-۳-٦- تحمل ضربه ۲۰
۲-۳-۷- گسیختگی ناشی از خزش و خستگی ۲۰
۲-۳-۸- دوام ۲۰
۲-۳-۹- ملاحظات مربوط به انتخاب پوشش محافظ ۲۱
۲-۳-۱۰- خصوصیات مصالح طراحی ۲۱
۲-٤- مقاومت کلی سازه ۲۲
۲-٥- کاربری‌های لرزه‌ای ۲۳
۲-٦- پدیده جداشدگی FRP ۲۳
۲-٦-۱- چسبندگی سطحی و پیوستگی بین FRP و بتن بستر ۲۳
۲-٦-۲- اتصال کامپوزیت آرماتورهای مدفون در بتن ۲۳
۲-٦-۳-اتصال تقویت‌کننده‌های چسبانده شده به بتن ۲٤
۲-۷- عوامل مؤثر در جداشدگی FRP ۲٥
۲-۷-۱- مقاومت حداقل بستر بتنی ۲٦
۲-۷-۲- تاثیر مقاومت بتن بر مقاومت چسبندگی ۲۷
۲-۷-۳- آماده سازی سطوح ۲۷
۲-۷-٤- هدف از آماده سازی سطوح ۲۸
۲-۷-٥- روشهای آماده سازی سطوح ۲۸
۲-۷-٦- آماده سازی سطح بتن ۲۸
۲-۷-۷- ویژگی و ضخامت چسب ۲۹
۲-۷-۸- سختی ورق FRP ۲۹
۲-۷-۹- طول چسبندگی موثر ۳۰

۲-۸- مدل‌های موجود مقاومت چسبندگی و طول چسبندگی موثر ۳۲
۲-۹- حالت های خرابی تیرهای بتنی مقاوم شده با FRP ۳۹
۲-۹-۱- نحوه شکست خمشی در مقطع بتنی مقاوم شده با ورق FRP ٤۱
۲-۹-۲- جداشدگی ناشی از ترک میانی ٤۱
۲-۹-۳- جداشدگی ناشی از کنده شدن پوشش بتن ٤۱
۲-۹-٤- کنده شدن اتصال انتهای ورق ٤۲
۲-۹-٥- جداشدگی بین صفحه ای ناشی از ترک قطری ٤۲
۲-۹-٦- سایر جنبه های از بین رفتن چسبندگی ٤۳
۲-۱۰- رفتار ستون‌های بتنی تحت بار محوری ٤۳
۲-۱۱- محصور کردن ستون‌های بتنی ٤٤
۲-۱۱-۱- اهداف اصلی محصور کردن ستون های بتنی ٤٤
۲-۱۱-۲- ستون‌های دایره‌ای کوتاه در فشار خالص ٤٦
۲-۱۱-۳- مطالعات آزمایشگاهی اولیه بر روی ستون های محصور شده ٤۷
۲-۱۱-٤- مطالعه رفتار بتن تحت تنش های چند محوری ٤۷
۲-۱۱-٥- آزمایشات اولیه ای در محصور کردن ستون های بتنی با FRP ٤۸
۲-۱۱-٦- اعتبار روابط تحلیلی در محصورشدگی غیرفعال ستون های دورپیچ شده با FRP ٤۸
۲-۱۱-۷- تأثیر زاویه قرارگیری الیاف FRP و تعداد لایه های دورپیچ در ستون های بتنی ٤۹
۲-۱۱-۸- بررسی حالت های خرابی ستون های بتنی دورپیچ شده با FRP ٥۱
۲-۱۱-۹- تاثیر مقاومت بتن بر محصورشدگی ستون با FRP ٥۱
۲-۱۱-۱۰- تاثیر لاغری ستون های بتنی در محصور شدگی با FRP ٥۱
۲-۱۱-۱۱- تاثیر اندازه و ابعاد ستون‌های استوانه‌ای دورپیچ شده با FRP ٥۲
۲-۱۱-۱۲- تعیین رفتار بتن پر مقاومت و بتن معمولی محصور شده با FRP ٥۳
۲-۱۱-۱۳- کرنش پیرامونی نهایی موثر ٥۳
۲-۱۱-۱٤- رفتار ستون‌های دایره‌ای با مقیاس واقعی ٥٦

۲-۱۱-۱۵- طول روی هم افتادگی لبه های دورپیچ FRP ٥٦
۳- فصل سوم: مواد و روش ها ٥٩
۳-۱- خلاصه ای از فعالیت های انجام شده در این تحقیقات ٥٩
۳-۲- تهیه مصالح ٦٠
۳-۲-۱- شن و ماسه ٦٠
۳-۲-۲- سیمان ٦٠
۳-۲-۳- آب ٦٠
۳-۲-٤- چسب اپوکسی ٦١
۳-۲-٥- بتن ٦١
۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها ٦١
۳-۳-۱- آزمایش دانه‌بندی ٦١
۳-۳-۲- آزمایش تعیین ضریب نرمی ماسه ٦٧
۳-۳-۳- آزمایش تعیین ضریب هم ارز ماسه ٦٧
۳-۳-٤- آزمایش تعیین جذب آب و رطوبت سطحی دانه‌ها ٦٨
-۳-٥- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی ٧١
۳-۳-٦- مراحل ساخت نمونه ها و چسباندن ورق CFRP ٧٢
۳-٤- آزمون "پیچش" (Twist – Off Method) ٨٠
۳-٤-۱- امتیازات آزمون "پیچش" ٨١
۳-٥-۱- استفاده از آزمون پیچش برای تعیین مقاومت آزمایشگاهی و درجای بتن ٨٢
۳-٥-۲- استفاده از آزمون پیچش برای اندازه‌گیری مقدار چسبندگی لایه‌های تعمیری و تقویتی بتنی و لایه‌های تقویت CFRP ٨٣
۳-٦- تعداد نمونه ها و نحوه بارگذاری در آزمایش های مختلف ٨٥
۳-٦-۱- نمونه های تیر ٨٥

۳-٦-۲- نمونه های ستون..... ۸٦
۳-٦-۳- نمونه های مکعبی..... ۸۸
٤- فصل چهارم: نتایج و تفسیر آنها..... ۹۱
٤-۱- نتایج گشتاور نهایی در آزمون "پیچش" بر رویFRP و بتن..... ۹۱
٤-۱-۱- خطاهای احتمالی نتایج گشتاور نهایی در آزمون "پیچش"بر رویCFRP و بتن..... ۹۵
٤-۱-۲- نتایج مقاومت های بدست آمده از روش "پیچش"..... ۹٦
٤-۲- نتایج مقاوت های فشاری نمونه های استوانه ای و مکعبی..... ۹۸
٤-۳- رابطه بین مقاومت بدست آمده از روش"پیچش" بر روی سطح بتن با مقاومت فشاری استوانه ای بتن..... ۹۹
٤-٤- تاثیر مقاومت فشاری بتن بر چسبندگی CFRP به بتن..... ۱۰۰
٤-۵- رابطه مقاومت سطحی و چسبندگی CFRP به بتن، بدست آمده از روش "پیچش"..... ۱۰۱
٤-٦- نتایج بدست آمده از آزمایش فشاری ستون های مقاوم شده با CFRP..... ۱۰۲
٤-۷- حالت خرابی ستون‌ها..... ۱۰۳
٤-۸- تاثیر مقاومت فشاری بتن بر میزان افزایش مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP..... ۱۰۷
٤-۹- رابطه بین مقاومت فشاری ستون محصور نشده و ستون محصور شده با CFRP..... ۱۰۹
٤-۱۰- تاثیر مقاومت چسبندگی CFRP به بتن در مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP..... ۱۱۰
٤-۱۱- تاثیر مقاومت سطحی بتن در مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP..... ۱۱۱
٤-۱۲- فشار محصور شدگی..... ۱۱۳
٤-۱۳- بررسی علت کاهش درصد افزایش مقاومت ستون های دورپیچ شده با افزایش مقاومت فشاری بتن..... ۱۱۳
٤-۱٤- محاسبه نسبت های افزایش مقاومت و محصورشدگی ستون های مقاوم شده..... ۱۱۵
٤-۱۵- روابط پیش‌بینی افزایش مقاومت ستون محصور شده با CFRP..... ۱۱۵
٤-۱٦- مقایسه نتایج با مدل های موجود در تخمین مقاومت ستون پس از محصور شدگی..... ۱۱٦

٤-١٧- نتایج حاصل از شکست تیرهای بتنی..... ١١٩
٤-١٧-١- شکست در تیرهای بتنی بدون CFRP..... ١١٩
٤-١٧-٢- شکست در تیرهای مقاوم شده با CFRP..... ١٢٠
٤-١٨- نتایج حاصل از بارگذاری تیرهای ساده و مقاوم شده با CFRP..... ١٢٦
٤-١٨-١- محاسبه مدول گسختگی در تیرهای مقاوم نشده و مقاوم شده با CFRP..... ١٢٨
٤-١٩- تاثیر مقاومت فشاری بتن بر درصد افزایش مقاومت نهایی تیر بتنی تقویت شده با CFRP ١٢٩
٤-٢٠- تاثیر مقاومت فشاری بتن بر مقاومت خمشی تیر ساده و تیر تقویت شده با CFRP..... ١٣٠
٤-٢١- تاثیر مقاومت سطحی بتن بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP..... ١٣١
٤-٢٢- تاثیر مقاومت چسبندگیCFRP به بتن بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP
..... ١٣٢
٤-٢٣- تاثیر مقاوم سازی با CFRP بر شکل پذیری تیرهای غیرمسلح بتنی..... ١٣٣
٤-٢٤- افزایش مقاومت برشی تیرهای مقاوم شده..... ١٣٥
٤-٢٥- مدل سازی در نرم افزار آباکوس..... ١٣٨
٤-٢٦- مدل سازی ستون ها در نرم افزار آباکوس..... ١٣٩
٤-٢٧- مدل سازی تیرها در نرم افزار آباکوس ١٤١
٥- فصل پنجم : جمع‌بندی و پیشنهادها ١٤٦
٥-١- نتیجه گیری ١٤٦
٥-٢ پیشنهادها ١٥٠
مراجع ١٥١

فهرست شکل ها

شکل (۲-۱) رشد تعداد مقالات مجله SCI (Science Citation Index) در کاربرد FRP ۱۱
شکل (۲-۲) انواع کاربردهای FRP در سازه ها ۱۲
شکل (۲-۳) روش چسباندن تر ۱۵
شکل(۲-٤) مصالح FRP پیش ساخته ۱۵
شکل(۲-۵) سیستم دورپیچ کردن اتوماتیک ستون ها.(a)شماتیک.(b)ربات دورپیچ کننده ۱٦
شکل(۲-٦) منحنی تنش- کرنش مصالح مختلف تحت کشش محوری. ۱۸
شکل(۲-۷) اتصال آرماتورهای مدفون در بتن ۲٤
شکل(۲-۸) اتصال تقویت‌کننده‌های چسبانده شده به بتن ۲٤
a. رفتار عضو خمشی با ورق چسبانده شده در کف تیر ۲۵
b. جداشدگی ناشی از ترک های خمشی و یا برشی ۲۵
c. کنده کاور بتن از انتهای FRP چسبانده شده ۲٦
شکل(۲-۹) جداشدگی و کنده شدن ورق FRP چسبانده شده به سطح خارجی ۲٦
شکل(۲-۱۰) مسیر گسترش جداشدگی ۲٦
شکل(۲-۱۱) تغییرات طول چسبندگی موثر برحسب آیین نامه های مختلف با سختی ورقFRP ۳۱
شکل(۲-۱۲) دو آزمایش [کشش و برش] و [فشار و برش] برای بررسی اتصال بتن و چسب. ۳۷
شکل(۲-۱۳) مودهای شکست تیرهای بتنی مقاوم شده با FRP ٤۰
شکل(۲-۱٤) مقایسه محصور شدگی با فولاد و FRP ٤٦
شکل(۲-۱۵) حالت سه محوری تنش در تقویت‌کننده‌های دورپیچ شده ۵٤
شکل(۳-۱) حمل مصالح شن از بچینگ به آزمایشگاه با لودر. ٦۲
شکل(۳-۲) جداسازی سنگدانه های بزرگتر از ۲۰ میلی متر. ٦۳
شکل(۳-۳) ترسیم منحنی دانه بندی در منحنی با محدوده های استاندارد برای دانه های با قطر حداکثر ۱۹میلیمتر. ٦۷
شکل(۳-٤) چگالی‌سنج حاوی آب و نمونه ماسه. ۷۰

شکل (۳-۵) نحوه آماده‌سازی نمونه‌های مختلف بتنی..... ۷٤
شکل (۳-٦) نمونه های آماده شده برای آزمایش های بعدی..... ۷٦
شکل (۳-۷) آماده سازی سطح نمونه ها..... ۷۷
شکل (۳-۸) اندازه گیری و برش ورق های CFRP..... ۷۷
شکل (۳-۹) استفاده از فشار باد قبل از نصب CFRP..... ۷۸
شکل (۳-۱۰) نحوه دورپیچ نمودن ستون ها با CFRP..... ۷۹
شکل (۳-۱۱) نحوه مقاوم سازی تیرها با CFRP..... ۷۹
شکل (۳-۱۲) نمونه های مکعبی جهت انجام آزمون "پیچش"..... ۸۰
شکل (۳-۱۳) نمونه های دارای ورق های CFRP جهت انجام آزمایش..... ۸۰
شکل (۳-۱٤) روش "پیچش" [۲]..... ۸۱
شکل (۳-۱۵) ایجاد نیم مغزه توسط مته الماسه بر روی CFRP..... ۸۳
شکل (۳-۱٦) استوانه های فلزی چسبانده شده بر روی CFRP..... ۸٤
شکل (۳-۱۷) نمونه های آماده شده جهت انجام آزمون "پیچش" بر روی CFRP..... ۸٤
شکل (۳-۱۸) نحوه انجام آزمون "پیچش"..... ۸٤
شکل (۳-۱۹) ترکمتر و استوانه های فلزی استفاده شده در آزمون "پیچش"..... ۸۵
شکل (۳-۲۰) نحوه مقاوم سازی قسمت های زیرین و کناری تیرهای بتنی با CFRP..... ۸۵
شکل (۳-۲۱) نحوه بارگذاری تیرهای بتنی..... ۸٦
شکل (۳-۲۲) بارگذاری تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP..... ۸٦
شکل (۳-۲۳) نحوه تقویت نمونه های ستون ها با ورق CFRP در جهت شعاعی..... ۸۷
شکل (۳-۲٤) حمل و کنترل نمونه ها جهت انجام آزمون فشاری..... ۸۸
شکل (۳-۲۵) نمونه استوانه ای در حال تست..... ۸۸
شکل (۳-۲٦) آزمون "پیچش" بر روی سطح بتن با استوانه های با قطر ٤ سانتیمتر..... ۸۹
شکل (۳-۲۷) آزمون "پیچش" بر روی CFRP با استوانه های با قطر ۵ سانتیمتر..... ۸۹

شکل (٤-١) نمونه های سری١(با مقاومت فشاری ٢٣/٠٣ مگاپاسکال) پس از انجام آزمون "پیچش". ٩٢
شکل (٤-٢) نمونه های سری٢(با مقاومت فشاری ٢٦/٤٢ مگاپاسکال) پس از انجام آزمون "پیچش". ٩٣
شکل (٤-٣) نمونه های سری٣(با مقاومت فشاری ٣٦/١٣ مگاپاسکال) پس از انجام آزمون "پیچش". ٩٣
شکل (٤-٤) نمونه های سری٤(با مقاومت فشاری ٣٩/٦٧ مگاپاسکال) پس از انجام آزمون "پیچش". ٩٤
شکل (٤-٥) نمونه های سری٥(با مقاومت فشاری ٤٣/٦٢ مگاپاسکال) پس از انجام آزمون "پیچش". ٩٤
شکل (٤-٦) رابطه بین مقاومت بدست آمده از روش "پیچش" بر سطح بتن و مقاومت فشاری استوانه ای بتن. ٩٩
شکل (٤-٧) تاثیر مقاومت فشاری بتن بر چسبندگی CFRP به بتن. ١٠٠
شکل (٤-٨) رابطه مقاومت سطحی و چسبندگی CFRP به بتن، بدست آمده از روش "پیچش". ١٠١
شکل (٤-٩) مقایسه مقاومت نهایی ستون ها، قبل و بعد از مقاوم سازی با CFRP. ١٠٣
شکل (٤-١٠) نمونه ستون محصور شده با ورق CFRP در حال انجام مراحل پایانی تست فشاری. ١٠٤
شکل (٤-١١) نمونه های ستون محصور شده با ورق CFRP پس از انجام آزمایش فشاری. ١٠٤
شکل (٤-١٢) انبساط حجمی در ستون های محصور شده با ورقCFRP پس از انجام آزمایش فشاری. ١٠٥
شکل (٤-١٣) چسبیدن بتن به ورق CFRP پس از انجام آزمایش فشاری. ١٠٥
شکل (٤-١٤) حفظ ناحیه روی هم افتادگی ورق CFRP پس از انجام آزمایش فشاری. ١٠٦
شکل (٤-١٥) تاثیر مقاومت فشاری بتن بر میزان افزایش مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP. ١٠٨

شکل (٤-١٦) تاثیر مقاومت فشاری بتن بر میزان افزایش مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP. ١٠٨
شکل (٤-١٧) مقایسه میانگین مقاومت های نهایی ستون های محصور نشده f_{co} و محصور شده f_{cc} ١٠٩
شکل (٤-١٨) رابطه بین مقاومت فشاری ستون محصور نشده و ستون محصور شده با CFRP..... ١٠٩
شکل (٤-١٩) تاثیر مقاومت چسبندگی CFRP به بتن در مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP. ١١٠
شکل (٤-٢٠) تاثیر مقاومت سطحی بتن در مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP..... ١١١
شکل (٤-٢١) تاثیر مقاومت سطحی بتن بر میزان افزایش مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP. ١١٢
شکل (٤-٢٢) تاثیر مقاومت سطحی بتن بر میزان افزایش مقاومت نهایی ستون دورپیچ شده با CFRP. ١١٢
شکل (٤-٢٣) فشار محصورشدگی ستون دایره ای..... ١١٣
شکل (٤-٢٤) پیش بینی افزایش مقاومت ستون محصور شده با CFRP (رگرسیون خطی)..... ١١٥
شکل (٤-٢٥) پیش بینی افزایش مقاومت ستون محصور شده با CFRP (رگرسیون خطی)..... ١١٦
شکل (٤-٢٦) پیش بینی افزایش مقاومت ستون محصور شده با CFRP (رگرسیون درجه ٢)..... ١١٦
شکل (٤-٢٧) ترسیم روابط مختلف در تخمین مقاومت ستون پس از محصور شدگی با FRP. ١١٨
شکل (٤-٢٨) شکست نمونه تحت بار در دستگاه تست خمشی. ١١٩
شکل (٤-٢٩) ترک عمودی خمشی در تیرهای بتنی..... ١١٩
شکل (٤-٣٠) کنده شدن ناشی از ترک برشی..... ١٢٠
شکل (٤-٣١) کنده شدن ناشی از ترک برشی قطری اصلی و نیروهای ایجاد شده..... ١٢٠
شکل (٤-٣٢) شکست تیرهای مقاوم شده با مقاومت فشاری استوانه ای ٢٣/٠٣ مگاپاسکال. ١٢١
شکل (٤-٣٣) شکست تیرهای مقاوم شده با مقاومت فشاری استوانه ای ٢٦/٤٢ مگاپاسکال. ١٢٢
شکل (٤-٣٤) شکست تیرهای مقاوم شده با مقاومت فشاری استوانه ای ٣٦/١٣ مگاپاسکال ١٢٢

شکل (٤-٣٥) شکست تیرهای مقاوم شده با مقاومت فشاری استوانه ای ٣٩/٦٧ مگاپاسکال. ١٢٣
شکل (٤-٣٦) شکست تیرهای مقاوم شده با مقاومت فشاری استوانه ای ٤٣/٦٢ مگاپاسکال. ١٢٤
شکل (٤-٣٧) شکست تیرهای مقاوم شده. ١٢٥
شکل (٤-٣٨) تیرهای مقاوم شده پس از آزمایش. ١٢٥
شکل (٤-٣٩) تاثیر مقاومت فشاری بتن بر درصد افزایش مقاومت نهایی تیر بتنی تقویت شده باCFRP. ١٢٩
شکل (٤-٤٠) تاثیر مقاومت فشاری بتن بر درصد افزایش مقاومت نهایی تیر بتنی تقویت شده با CFRP. ١٣٠
شکل (٤-٤١) تاثیر مقاومت فشاری بتن بر مقاومت خمشی تیر ساده و تیر تقویت شده با CFRP. ١٣٠
شکل (٤-٤٢) تاثیر مقاومت سطحی بتن بر مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده با CFRP..... ١٣١
شکل (٤-٤٣) تاثیر مقاومت چسبندگی CFRPبه بتن بر مقاومت تیر بتنی تقویت شده با CFRP.. ١٣٢
شکل (٤-٤٤) نصب گیج تغییرمکان سنج قبل از تست تیرها. ١٣٣
شکل (٤-٤٥) نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای سریB1 . ..... ١٣٣
شکل (٤-٤٦) نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای سریB2. ..... ١٣٤
شکل (٤-٤٧) نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای سری B3. ..... ١٣٤
شکل (٤-٤٨) نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای سری B4. ..... ١٣٥
شکل (٤-٤٩) درصد افزایش مقاومت برشی تیرهای مقاوم سازی شده با CFRP..... ١٣٦
شکل (٤-٥٠) روند درصد افزایش مقاومت برشی تیرهای مقاوم سازی شده با CFRP..... ١٣٧
شکل (٤-٥١) شکل المان S4R و نقطه انتگرال گیری ١٣٨
شکل (٤-٥٢) شکل المان C3D8R ١٣٨
شکل (٤-٥٢) تغییر شکل پلاستیک در ستون دورپیچ شده با مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال..... ١٣٩
شکل (٤-٥٣) مقدار تنش های ایجاد شده در ستون دورپیچ شده در جهت خارج از صفحه با مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال. ١٤٠