دانشگاه اراک

دانشکده فنی و مهندسی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش سازه)

بررسی شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح مقاوم‌سازی شده توسط FRP

پژوهشگر

زهرا اشعری فرد

استاد راهنما

دکتر سید حمید هاشمی

زمستان ۱۳۹۰

بسم ا... الرحمن الرحیم

بررسی شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح مقاوم‌سازی شده توسط FRP

توسط:

زهرا اشعری فرد

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های

تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران-سازه

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر سید حمید هاشمی (استاد راهنما و رئیس کمیته)..... استادیار

دکتر علیرضا آذربخت (دانشگاه اراک) ..... استادیار

دکتر محسن ابوطالبی(دانشگاه اراک)..... استادیار

زمستان ۱۳۹۰

تقدیم به

نخستین آموزگاران زندگانی،

پدر و مادر فرزانه‌ام

و

خواهر و برادر عزیزم

سپاسگزاری

منت خدای را عزّوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممدّ حیاتست و چون بر می‌آید مفرّح ذات؛ پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب.

اکنون که به یاری و لطف خدا این پایان‌نامه به پایان رسیده است، قبل از هرچیز باید از زحمات بی‌شائبه پدر و مادر عزیزم که هرچه دارم از آنهاست تقدیر و تشکر نمایم. لازم می‌دانم از زحمات و پشتیبانی بی‌دریغ استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر سید حمید هاشمی که در انجام این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم.
همچنین از تمامی دوستان عزیزم که مرا در تهیه و تنظیم این پایان‌نامه یاری کردند نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

مسئله حائز اهمیت برای اعضای خمشی بتن معمولی و با مقاومت بالا به ویژه در مناطق زلزله‌خیز، "طراحی بر اساس شکل‌پذیر" بودن چنین اعضایی می‌باشد که متاسفانه در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتنی دنیا از جمله آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، طراحی اعضا بر اساس شکل‌پذیری بنیانگذاری نشده است. اهمیت این مساله برای اعضای مقاوم‌سازی شده دو چندان می‌شود. لذا، در این تحقیق یک روش تحلیلی و فرمولهای ساده شده‌ای برای بررسی شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح پر مقاومت (HSRC) با مقطع مستطیلی ارائه شده است تا بتواند برای تیرهای HSRC مقاوم‌سازی نشده، نسبت میلگرد کششی مجاز و برای تیرهای HSRC مقاوم‌سازی شده با FRP، مساحت مجاز ورق FRP را برای رسیدن به یک مقدار مشخص شکل‌پذیری تعیین کند. روش پیشنهادی یک ابزار اضافی برای طراحی بهتر مراحل شکل‌پذیری در اختیار طراحان قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که برای اطمینان از عملکرد شکل‌پذیر تیرهای تقویت شده، باید شرایط اضافی مانند گسیختگی موضعی لایه بتن بین میلگرد کششی و ورق FRP یا چسبندگی ورق با خودش نیز کنترل شود.

نتایج روش تحلیلی با نتایج عددی و آزمایشگاهی گزارش شده در سایر مقالات و همچنین روابط آیین‌نامه ACI و CSA مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی نسبت به روابط آیین‌نامه ACI و CSA، مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشته و این امر حاکی از عملکرد صحیح روش پیشنهادی است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- دلایل ترمیم و تقویت ۲

۱-۳- روش های ترمیم و تقویت اجزاء بتن مسلح ۳

۱-۳-۱- دورپیچ کردن با فولاد (زره پوش فولادی) ۳

۱-۳-۲- ژاکت های بتن آرمه ۴

۱-۳-۳- تقویت با فولاد ۵

۱-۳-۴- تزریق اپوکسی ۵

۱-۳-۵- بخیه زدن ۵

۱-۳-۶- پیش تنیدگی خارجی ۶

۱-۳-۷- استفاده از FRP ها ۶

۱-۴- مزیت‌های استفاده از FRP در ترمیم سازه‌های بتنی نسبت به سایر روش‌ها ۶

۱-۴-۱- وزن کم ۷

۱-۴-۲- انعطاف پذیری بالا ۷

۱-۴-۳- راحتی درجابجایی ۷

۱-۴-۴- سرعت عمل بالا ۸

۱-۴-۵- راحتی برش دراندازه های دلخواه ۸

۱-۴-۶- سادگی اجرا ۸

۱-۴-۷- امکان تقویت به صورت خارجی ۸

۱-۵- کاربرد از بتن با مقاومت بالا ۹

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته ۱۲

۲-۱- مقدمه ۱۳
۲-۲- عوامل موثر بر کارایی کامپوزیتهای FRP ۱۳
۲-۲-۱- الیاف ۱۴
۲-۲-۱-۱- انواع الیاف ۱۵
۲-۳- تقویت خمشی ۱۶
۲-۴- طبقه بندی مدهای شکست ۱۷
۲-۵- مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ۱۸
۲-۵-۱- الگوریتم پیشنهادی Lee و Pan (۲۰۰۳) برای تخمین ارتباط بین میلگرد کششی و شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح با مقاومت معمولی (NSRC) ۱۹
۲-۵-۱-۱- مدل تنش-کرنش بتن ۱۹
۲-۵-۱-۲- مدل تنش-کرنش فولاد ۲۰
۲-۵-۱-۳- برآیند نیروهای فشاری بتن ۲۱
۲-۵-۱-۴- شکل‌پذیری انحنا ۲۳
۲-۵-۱-۵- انحنای تسلیم ۲۳
۲-۵-۱-۶- انحنای نهایی ۲۴
۲-۵-۱-۷- ارتباط بین آرماتور کششی و انحنا ۲۴
۲-۵-۲- الگوریتم پیشنهادی Lee و همکارانش (۲۰۰۴) برای تخمین ارتباط بین نسبت ورق FRP و شکل‌پذیری تیرهای NSRC ۲۷
۲-۵-۲-۱- حالت تسلیم ۲۷
۲-۵-۲-۲- حالت نهایی ۲۸
۲-۵-۳- بررسی مدل تنش-کرنش Oztekin (۲۰۰۳) برای بتن مقاومت بالا ۳۲
۲-۵-۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی Rashid و Mansur (۲۰۰۵) در مورد تیرهای بتن مسلح پر مقاومت ۳۷
۲-۵-۴-۱- رفتار کلی تیرها ۳۹
۲-۵-۴-۲- نتایج آزمایش و تحلیل آنها ۴۰
۲-۵-۵- بررسی مودهای گسیختگی تیرهای تقویت شده با CFRP با استفاده از نتایج آزمایشگاهی Fanning و Kelly (۲۰۰۱) ۴۲
۲-۵-۵-۱- جزئیات آزمایش تیرها ۴۳
۲-۵-۵-۲- نتایج آزمایش ۴۵

۲-۵-۶- بررسی رفتار خمشی تیرهای مقاوم سازی شده Hashemi (۲۰۰۸) ۴۶

فصل سوم: بررسی شکل پذیری تیرهای بتن مسلح ۵۱

۳-۱- شکل پذیری ۵۲

۳-۱-۱- مقدمه ۵۲

۳-۱-۲- اهمیت شکل پذیری ۵۲

۳-۱-۳- روشهای تعریف شکل پذیری ۵۳

۳-۱-۴- شکل پذیری تیرهای بتن مسلح ۵۶

۳-۱-۴-۱- متغییرهای مؤثر در شکل پذیری سطع مقطع تیرها ۵۶

۳-۱-۴- ۲- تعریف نسبت شکل‌پذیری در تیر ۵۹

۳-۱-۴-۳- متغییرهای مؤثر در شکل پذیری تیرها ۶۰

۳-۲- مروری بر جریان محدودیت آیین‌نامه‌ها روی نسبت میلگرد کششی ۶۳

۳-۳- ارائه روش‌های تحلیلی برای بررسی شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح ۶۴

۳-۳-۱- بررسی صحت الگوریتم پیشنهادی Lee و Pan (۲۰۰۳) در خصوص بررسی شکل‌پذیری تیرهای NSRC مقاوم سازی نشده ۶۴

۳-۲-۱-۱- فرمول ساده شده ۶۴

۳-۳-۲- بررسی صحت الگوریتم پیشنهادی Lee و همکارانش (۲۰۰۴) در خصوص بررسی شکل‌پذیری تیرهای NSRC تقویت شده با FRP ۶۹

۳-۳-۲-۱- فرمول ساده شده ۷۱

۳-۳-۳- بررسی شکل‌پذیری تیرهای HSRC تقویت نشده ۷۴

۳-۳-۳-۱- تعیین پارامتر بلوک تنش ۷۵

۳-۳-۳-۲- برآیند نیروهای فشاری بتن ۷۵

۳-۳-۳-۳- مدل تنش ـ کرنش فولاد ۷۶

۳-۳-۳-۴- شکل پذیری انحنا ۷۶

۳-۳-۳-۵- حالت تسلیم ۷۶

۳-۳-۳-۶- حالت نهایی ۷۷

۳-۳-۳-۷- مثال طراحی ۷۹

۳-۳-۳-۸- فرمول ساده شده ۸۱

۳-۳-۳-۹- مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی اکبرزاده ۸۲
۳-۳-۴- بررسی شکل‌پذیری تیرهای HSRC تقویت شده با FRP ۸۸
۳-۳-۴-۱- شکل‌پذیری انحنا ۸۹
۳-۳-۴-۲- انحنای تسلیم ۸۹
۳-۳-۴-۳- انحنای نهایی ۹۰
۳-۳-۴-۴- مثال طراحی ۹۳
۳-۳-۴-۵- فرمول ساده شده ۹۵

فصل چهارم: آنالیز مقطع عرضی تیر ۹۷
۴-۱- معرفی مدل تحلیلی.....۹۸
۴-۱-۱- مدل تنش-کرنش ورق FRP ۹۹
۴-۳-۲- مدل تنش-کرنش فولاد ۱۰۰
۴-۱-۳- مدل تنش-کرنش بتن ۱۰۱
۴-۱-۴- محاسبه ممان مقاوم و انحنا (محاسبه تنش و کرنش تئوری) ۱۰۳
۴-۱-۵- قبل از ترک خوردن بتن ۱۰۴
۴-۱-۶- بعد از ترک خوردن بتن و قبل از تسلیم فولاد ۱۰۵
۴-۱-۷- بعد از تسلیم فولاد ۱۰۵
۴-۱-۸- محاسبه خیز وسط دهانه تیر ۱۰۶
۴-۱-۹- مقایسه منحنی‌های ممان-انحنا و ممان-خیز آزمایشگاهی و تئوری ۱۰۶
۴-۱-۱۰- مقایسه بین ممان تئوری و آزمایشگاهی ۱۱۱
۴-۱-۱۱- مقایسه عمق تار خنثی ۱۱۳
۴-۲- مدل سه خطی ممان- خیز ۱۱۷
۴-۲-۱- گام اول: محاسبه ممان ترک خوردگی (M_{cr}) و تغییر شکل مطابق با آن (δ_{cr}).....۱۱۸
۴-۲-۲- گام دوم: محاسبه ممان لازم برای تسلیم فولاد (M_y) و تغییر شکل مطابق با آن (δ_y) ۱۱۹
۴-۲-۳- گام سوم: محاسبه ممان نهایی (M_u) و تغییر شکل مطابق با آن (δ_u) ۱۲۲
۴-۲-۴- اصلاح مدل ۳ خطی ممان-خیز برای بتن مقاومت بالا ۱۲۳
۴-۲-۵- بررسی صحت مدل سه خطی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سایر مقالات.۱۲۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۴
۵-۱- نتایج مربوط به شکل‌پذیری ۱۳۵
۵-۲- نتایج مربوط به آنالیز مقطع ۱۳۶
۵-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آینده ۱۳۷

پیوست ۱۳۹

فهرست منابع فارسی ۱۵۰
فهرست منابع لاتین ۱۵۱

چکیده انگلیسی
صفحه عنوان انگلیسی

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱-کاربردهای مختلف FRP در تقویت اعضای بتن ۱۴
شکل۲-۲- انواع الیاف.....۱۵
شکل۲-۳- نمودار تنش- کرنش الیاف پلیمری در مقایسه با فولاد معمولی ۱۶
شکل۲-۴- حالت های مختلف شکست تیر بتن مسلح تقویت شده با FRP ۱۸
شکل۲-۵- مدل بتن محصور شده kent و Park ۲۰
شکل۲-۶- منحنی تنش-کرنش فولاد ۲۱
شکل۲-۷- بتن ناحیه فشاری ۲۲
شکل۲-۸- توزیع تنش و کرنش در مقطع عرضی ۲۳
شکل۲-۹- توزیع تنش و کرنش در یک مقطع عرضی تقویت شده با FRP ۲۷
شکل۲-۱۰- اطلاعات تیرهای تست شده توسط Bencardino ۳۱
شکل۲-۱۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج روش تحلیلی ۳۱
شکل۲-۱۲- منحنی تنش-کرنش بتن معمولی پیشنهاد شده توسط Hognestad ۳۳
شکل۲-۱۳- منحنی های تنش-کرنش Hognestad، Hognestad اصلاح شده و آزمایشگاهی.....۳۵
شکل۲-۱۴- بلوک تنش مستطیل معادل و توزیع خطی کرنش ۳۶
شکل۲-۱۵- جزئیات تیرهای آزمایشگاهی Rashid وMansur ۳۷
شکل۲-۱۶- منحنی بار-خیز وسط دهانه: (a) منحنی ایده ال، (b) مقاومت بتن، (c) میلگرد کششی، (d) میلگرد فشاری، و (e) فاصله خاموتها.....۴۰
شکل۲-۱۷- تأثیر نسبت میلگرد کششی بر شکل پذیری تیر: (a) نتایج آزمایشگاه، (b) تغییر در نسبت میلگرد و مقاومت بتن برای رسیدن به مقدار شکل پذیری انحنا برابر ۳..... ۴۲
شکل۲-۱۸- جزئیات تیرهای آزمایش شده توسط Fanning و Kelly (۲۰۰۱) ۴۳
شکل۲-۱۹- پاسخ بار - خیز تیرهای آزمایش Fanning و Kelly (۲۰۰۱) ۴۴
شکل۲-۲۰- کرنش بتن وسط دهانه ۴۶
شکل۲-۲۱- مشخصات هندسی تیر و نحوه قرار گیری میلگردها و وسائل اندازه گیری ۴۷

شکل۲ـ۲۲ـ مقایسه منحنی های ممان-خیز آزمایشگاهی و تئوری تیرهای سری A ۵۰
شکل۳-۱- نمودار رفتار اعضاء شکل پذیر و ترد ۵۲
شکل۳-۲- تعاریف مختلف انحنای نهایی ۵۵
شکل۳-۳- دیاگرام‌های ممان ـ انحنا مربوط به سطح مقاطع تیر ۵۷
شکل۳-۴- تاثیر فولاد فشاری بر شکل پذیری ۵۸
شکل۳-۵- تأثیر فولاد فشاری بر شکل پذیری ۵۹
شکل۳-۶- دیاگرام انحنا در یک تیر ساده ۶۱
شکل۳-۷- دیاگرام اثر برش در چرخش‌های لولا ۶۲
شکل۳-۸- تغییرات نسبت میلگرد کششی برای مقادیر مختلف μ_ϕ و مقاومت مصالح مختلف ۶۷
شکل۳-۹- مقطع فرض شده توسط An و همکارانش(۱۹۹۱) ۷۰
شکل۳-۱۰- منحنی تنش ـ کرنش پیشنهادی Oztekin برای بتن پر مقاومت ۷۴
شکل۳ـ۱۱ـ پروفیل‌های تنش و کرنش در یک مقطع بتن پر مقاومت تقویت نشده ۷۶
شکل۳-۱۲- روند طراحی در تیرهای HSRC تقویت نشده ۷۹
شکل۳-۱۳- نقشه اجرایی تیرهای آزمایش شده توسط اکبرزاده (۱۳۸۳) ۸۰
شکل۳-۱۴- مقایسه شکل‌پذیری انحنای آزمایشگاهی و تئوری تیرهای آزمایش شده توسط اکبرزاده، محمدحسنی و قنبری ۸۷
شکل۳-۱۵- اثر فولاد کششی بر شکل‌پذیری انحنای آزمایشگاهی و تئوری تیرهای آزمایش شده توسط اکبرزاده (۱۳۸۳)، محمدحسنی و قنبری (۱۳۸۲) ۸۸
شکل۳-۱۶- اثر (الف) فولاد فشاری و (ب) پارامتر ρ'/ρ بر شکل‌پذیری انحنای آزمایشگاهی و تئوری تیرهای آزمایش شده توسط اکبرزاده (۱۳۸۳)، محمدحسنی و قنبری (۱۳۸۲) ۸۸
شکل۳-۱۷- پروفیل‌های تنش و کرنش در یک مقطع بتن پر مقاومت تقویت شده با FRP ۸۹
شکل۳-۱۸- روند طراحی در تیرهای HSRC مقاوم سازی شده با FRP ۹۲
شکل۳-۱۹- مقطع عرضی تیر آزمایش شده توسط Hashemi (۲۰۰۸) ۹۳
شکل۴-۱- کرنش، تنش‌ها و نیروهای استفاده شده در مدل ممان ـ انحنا ۹۸
شکل۴-۲- منحنی شماتیک ممان ـ انحنا ۹۹
شکل۴-۳- مدل تنش ـ کرنش FRP ۹۹
شکل۴-۴- مدل تنش ـ کرنش فولاد ۱۰۱
شکل۴-۵- مقایسه منحنی‌های تنش ـ کرنش بتن ۱۰۲
شکل۴-۶- مقایسه منحنی ممان ـ انحنای تحلیلی و آزمایشگاهی تیرهای اکبرزاده (۱۳۸۳)..... ۱۰۹

شکل۴-۷- مقایسه منحنی ممان-خیز تحلیلی و آزمایشگاهی تیرهای Hashemi ۱۰۹
شکل۴-۸- مقایسه منحنی ممان- انحنای تئوری تیرهای اکبرزاده جهت بررسی تاثیر فولاد کششی ۱۱۰
شکل۴-۹- مقایسه منحنی ممان-انحنای تئوری تیرها با فولاد کششی یکسان جهت بررسی فولاد فشاری در تیرهای آزمایشگاهی اکبرزاده ۱۱۰
شکل۴-۱۰- مقایسه منحنی‌های ممان- خیز تئوری تیرهای Hashemi ۱۱۰
شکل۴-۱۱- مقایسه عمق تار خنثی آزمایشگاهی و تئوری تیرهای آزمایشگاهی اکبرزاده ۱۱۵
شکل۴-۱۲- عمق تار خنثی تئوری تیرهای Hashemi ۱۱۵
شکل۴-۱۳- تاثیر فولاد کششی بر رفتار عمق محور خنثی در تیرهای آزمایشگاهی اکبرزاده ۱۱۶
شکل۴-۱۴- تاثیر فولاد فشاری بر رفتار عمق تار خنثی در تیرهایی با فولاد کششی یکسان در تیرهای آزمایشگاهی اکبرزاده ۱۱۶
شکل۴-۱۵- مقایسه عمق تار خنثی تیرهای Hashemi ۱۱۶
شکل۴-۱۶- منحنی‌های ممان-خیز وسط دهانه برای تیرهای آزمایش شده توسط Toutanji و همکارانش (۲۰۰۶) ۱۱۷
شکل۴-۱۷- مدل شماتیک منحنی ممان-خیز ۱۱۸
شکل۴-۱۸- پارامترهای ابعاد تیر و مقطع عرضی ۱۱۸
شکل۴-۱۹- مدل بتن برای فشار تک محوری ۱۱۹
شکل۴-۲۰- تنش‌ها و نیروها در مقطع عرضی تیر ۱۲۰
شکل۴-۲۱- کاهش مدول الاستیسیته فولاد بعد از تسلیم ۱۲۲
شکل۴-۲۲- مقایسه بین منحنی‌های ممان-خیز آزمایشگاهی و تئوری تیرهای آزمایش شده توسط Toutanji و همکارانش (۲۰۰۶) ۱۲۵
شکل۴-۲۳- مقایسه ممان تسلیم آزمایشگاهی و تئوری ۱۲۹
شکل۴-۲۴- مقایسه ممان نهایی آزمایشگاهی و تئوری ۱۳۰
شکل۴-۲۵- مقایسه خیز تسلیم آزمایشگاهی و تئوری ۱۳۰
شکل۴-۲۶- مقایسه خیز نهایی آزمایشگاهی و تئوری ۱۳۱
شکل ۴-۲۷- مقایسه منحنی ممان-خیز آزمایشگاهی، تحلیلی و مدل سه خطی تیرهای آزمایش شده توسط Hashemi (۲۰۰۸) ۱۳۲
شکل ۴-۲۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی، مدل تحلیلی و مدل سه خطی تیرهای آزمایش شده توسط Hashemi (۲۰۰۸) ۱۳۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- خصوصیات مکانیکی و نسبت اختلاط بتن ۳۳

جدول۲-۲- مشخصات تیرهای آزمایشگاهی و خلاصه ای از نتایج آزمایش ۳۸

جدول۲ـ۳ـ برنامه آزمایش Fanning و Kelly (۲۰۰۱) ۴۴

جدول۲-۴- خلاصه نتایج آزمایش تیرهای F1-F10 ..... ۴۵

جدول۲ـ۵ـ مقادیر بار و خیز وسط دهانه تیرها در حالت تسلیم و نهایی ۴۹

جدول۲ـ۶ـ نسبت شکل پذیری جابجایی و انحنا ۴۹

جدول۲ـ۷ـ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مقادیر تئوری ۵۰

جدول۳-۱- مقایسه بین نتایج بدست آمده از الگوریتم و نتایج حل کامپیوتری گزارش شده بوسیله Park و Dai (۱۹۸۸) برای ۸ و ۱۰ = μ_ϕ ۶۶

جدول۳-۲- ضرایب F_1 و G_1 برای فرمول شکل پذیری $\rho = F_1(\mu_\phi)^{G_1}$ ۶۹

جدول۳-۳- مشخصات تیرهای بررسی شده توسط An و همکارانش (۱۹۹۱) ۷۰

جدول۳-۴- مقایسه نتایج عددی An و روش تحلیلی Lee ۷۱

جدول۳-۵- ضرایب رگرسیونی برای فرمول‌های (۳-۳) و (۳-۴) ۷۳

جدول۳-۶- ضرایب F_2 و G_2 برای فرمول شکل پذیری $\rho = F_2(\mu_\phi)^{G_2}$ ۸۲

جدول۳-۷- مشخصات تیرهای آزمایش شده توسط اکبرزاده (۱۳۸۳) ۸۳

جدول۳-۸- مقایسه ρ آزمایشگاهی و تئوری تیرها ۸۵

جدول۳-۹- مقایسه مقادیر انحنای تسلیم، انحنای نهایی و شکل پذیری انحنای تئوری تیرها ۸۶

جدول۳-۱۰- ضرایب رگرسیونی برای فرمول‌های (۳-۴۲) و (۳-۴۳) ۹۶

جدول۴-۱- مقایسه ممان ترک خوردگی، ممان تسلیم و ممان نهایی آزمایشگاهی و تئوری مقطع تیرها ۱۱۲

جدول۴-۲- مقایسه ممان ترک خوردگی و ممان نهایی حاصل از روش تحلیلی با آیین نامه ACI و CSA در تیرهای آزمایشگاهی اکبرزاده ۱۱۲

جدول۴-۳- مشخصات تیرهای آزمایش شده توسط Toutanji و همکارانش (۲۰۰۶) ۱۲۴

جدول۴-۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری ممان و خیز تیرهای آزمایش شده توسط Toutanji و همکارانش (۲۰۰۶) ۱۲۴
جدول۴-۵- مشخصات تیرهای آزمایش شده توسط سایر محققین ۱۲۷
جدول۴-۶- مقایسه ممان تسلیم آزمایشگاهی و تئوری ۱۲۷
جدول۴-۷- مقایسه ممان نهایی آزمایشگاهی و تئوری ۱۲۸
جدول۴-۸- مقایسه خیز تسلیم آزمایشگاهی و تئوری ۱۲۸
جدول۴-۹- مقایسه خیز نهایی آزمایشگاهی و تئوری ۱۲۹
جدول۴-۱۰- مقایسه مقادیر ممان و خیز آزمایشگاهی، مدل تحلیلی و مدل سه خطی تیرهای آزمایش شده توسط Hashemi (۲۰۰۸) ۱۳۲

فهرست علایم اختصاری

A عدد ثابت

A_{con} سطح زیر منحنی تنش-کرنش بتن

A_s مساحت میلگرد کششی، mm^2

A'_s مساحت میلگرد فشاری، mm^2

A_{pl} مساحت ورق FRP، mm^2

a طول دهانه برشی تیر، mm

B عرض هسته محصور شده بتن و یا یک عدد ثابت در فرمولهای تحلیلی

b عرض مقطع تیر، mm

b_{pl} عرض ورق FRP، mm

C عدد ثابت

C_c برآیند نیروی فشاری بتن، KN

C'_s نیروی فشاری میلگرد، KN

c عمق تار خنثی، mm

c_1 نسبت عرض ناحیه محصور شده به عرض مقطع عضو

c_2 نسبت عمق بخش محصور شده فشاری به عمق کامل ناحیه فشاری بتن

$$\frac{c-d'}{c}=\frac{kd-d'}{kd}=$$

D عدد ثابت

d عمق موثر مقطع، mm

d' فاصله تار خارجی بتن از مرکز میلگردهای فشاری، mm

d'' فاصله ورق FRP از مرکز میلگردهای کششی، mm

d_c فاصله محل اثر نیروی فشاری بتن از تار بالایی بتن، mm

E عدد ثابت

E_c مدول الاستیسیته بتن، MPa

E_s	مدول الاستیسیته فولاد، MPa
E_{sy}	مدول الاستیسیته فولاد پس از تسلیم، GPa
E_{pl}	مدول الاستیسیته ورق FRP، GPa
F	عدد ثابت
F_a	سطح زیر منحنی تنش-کرنش بتن
f_c	تنش در بتن، MPa
f'_c	مقاومت فشاری مشخصه بتن، MPa
f_{pl}	تنش در ورق FRP، MPa
f_{plr}	مقاومت گسیختگی ورق FRP، MPa
f_r	مدول گسیختگی بتن، MPa
f_s	تنش در فولاد کششی، MPa
f'_s	تنش در فولاد فشاری، MPa
f_u	تنش نهایی فولاد، MPa
f_y	تنش تسلیم فولاد، MPa
f_{yh}	تنش تسلیم آرماتورهای عرضی، MPa
G	عدد ثابت
H	عدد ثابت
h	ضخامت کل مقطع، mm
I	عدد ثابت
I_c	ممان اینرسی مقطع تیر
I_{cr}	ممان اینرسی مقطع ترک خورده قبل از تسلیم فولاد
I'_{cr}	ممان اینرسی مقطع ترک خورده پس از تسلیم فولاد
J	عدد ثابت
K	عدد ثابت
k	نسبت عمق تار خنثی به عمق موثر
k_1	پارامترهای بلوک تنش مستطیلی

k_2 پارامترهای بلوک تنش مستطیلی

k_3 پارامترهای بلوک تنش مستطیلی

k_m ضریب کاهش کرنش FRP

L عدد ثابت

l طول بین دو تکیه‌گاه، mm

l_{pl} طول ورق FRP، mm

M یک عدد ثابت در فرمولهای تحلیلی و یا ممان مقاوم داخلی مقطع $KN.m$

M_c کل ممان خمشی ایجاد شده توسط بتن، $KN.m$

M_{cr} ممان ترک خوردگی، $KN.m$

M_u ممان نهایی تیر بتن مسلح، $KN.m$

M_y ممان تسلیم تیر بتن مسلح، $KN.m$

m عدد ثابت

N عدد ثابت

n تعداد لایه‌های ورق FRP

P عدد ثابت

P_u بار تسلیم، KN

P_y بار نهایی، KN

Q عدد ثابت

R عدد ثابت

s فاصله آرماتورهای عرضی، mm

t_{pl} ضخامت ورق FRP، mm

z_c پارامتر تنش-کرنش در بتن محصور شده

α ضریب تنش برای برآیند نیروهای فشاری بتن

δ_c خیز وسط دهانه تیر، mm

δ_{cr} خیز وسط دهانه تیر در شروع ترک خوردن بتن، mm

δ_u خیز نهایی تیر در وسط دهانه، mm

δ_y خیز تسلیم تیر در وسط دهانه، mm

ε_c کرنش در بتن

ε_{ce} کرنش در تار خارجی بتن ناحیه فشاری زمانیکه میلگرد کششی تسلیم می‌شود

ε_{cm} کرنش در تار خارجی بتن محصور شده ناحیه فشاری

ε_{co} کرنش بتن در f_c'

ε_{ct} کرنش بتن در دورترین تار کششی

ε_{cu} کرنش نهایی در تار خارجی بتن ناحیه فشاری

ε_{20c} کرنش فشاری بتن زمانیکه تنش بتن به ۰/۲ f_c' کاهش پیدا کند

$\bar{\varepsilon}_c$ کرنش در مرکز سطح زیر نمودار تنش-کرنش بتن

ε_{pl} کرنش در ورق FRP

ε_{plf} کرنش گسیختگی FRP

ε_{plu} کرنش نهایی FRP که از آزمایش کشش کامپوزیت بدست می‌آید

ε_s کرنش در فولاد کششی

ε_s' کرنش در فولاد فشاری

ε_{sh} کرنش سخت شدگی فولاد

ε_u کرنش نهایی فولاد

ε_y کرنش تسلیم فولاد

μ_δ شکل پذیری جابجایی تیرهای بتن مسلح

μ_ϕ شکل پذیری انحنا در تیرهای بتن مسلح

ρ نسبت میلگرد کششی

ρ' نسبت میلگرد فشاری

ρ_b نسبت میلگرد برای حالت بالانس

ρ_{Pl} نسبت مساحت ورق FRP

ρ_s نسبت حجمی آرماتورهای عرضی

ϕ انحنای مقطع، $1/mm$