بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری مهندسی عمران گرایش سازه

تحلیل تیرهای سراسری بتن مقاومت بالا مقاوم‌سازی‌شده با FRP

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر مقصودی

مؤلف:

حبیب اکبرزاده بنگر

دی ۱۳۸۸

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه دکتری به

بخش مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل از دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : حبیب اکبرزاده بنگر

استاد راهنما : دکتر علی اکبر مقصودی

داور ۱ : دکتر علیرضا رهائی

داور ۲ : دکتر فریبرز ناطقی الهی

داور ۳ : دکتر جواد سلاجقه

داور ٤ : دکتر سعید شجاعی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده:

حق چاپ محفوظ و مخصوص دانشگاه است.

چکیده : مواد پلیمری مسلح شده با کربن و شیشه (Carbon and Glass fiber reinforced polymer (CFRP & GFRP) دو ماده مناسب برای مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. این مواد علیرغم داشتن مقاومت زیاد از شکل‌پذیری پایینی برخوردار است. از طرفی شکست زودرس (Premature Failure) مانند شکست پوسته شدن (Cover Sepration) و جداشدگی ورق FRP از بتن (Debonding) بخصوص ترک میانی(Intermediate Crack Debonding)، افزایش در ظرفیت باربری عضو را محدود می‌سازد و از رسیدن عضو به ظرفیت کامل و شکل پذیری مناسب جلوگیری می‌کند. همچنین بتن غیر مسلح مقاومت بالا ترد شکن می‌باشد. اگر چه اکثر تیرهای بتن مسلح اجرا شده، تیرهای سراسری می‌باشند، اما تحقیقات بسیار کمی درنحوه عملکرد این گونه تیرهای مقاوم‌سازی شده با FRP انجام گرفته است. تیرهای سراسری بخاطر نا معینی، جهت ایمنی و اقتصادی شدن، نیاز به باز پخش لنگر دارد، در حالی که تیرهای مقاوم‌سازی شده با FRP از شکل پذیری کمی برخوردار است. همچنین روش طرح پیشنهادی آئین نامه‌ها مبتنی است بر نتایج تحقیقاتی تیرهای با تکیه گاه ساده مقاوم‌سازی شده با FRP محققین می‌باشد. در این تز، عملکرد تیرهای سراسری (دو دهانه) بتن مقاومت بالا مقاوم سازی شده با سه نوع ماده کامپوزیتی، CFRP، GFRP و مواد دوگانه Hybrid CFRP/GFRP بصورت آزمایشگاهی و تئوری پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدار ۹ عدد تیر دارای بتن مقاومت بالا سراسری (دو دهانه) با ابعاد ۱۵۰×۲۵۰×۶۰۰۰ میلیمتر ساخته شده و پس از مقاوم‌سازی هشت عدد آنها با استفاده از مقادیر مختلفCFRP، GFRP وHybrid CFRP/GFRP بارگذاری آنها تا مرحله تخریب انجام گرفت. پارامترهای مورد مطالعه در این آزمایش شامل نوع آرایش مقاوم‌سازی، مهار انتهائی U، نوع مواد مقاوم‌سازی (CFRP یا GFRP یا CFRP+GFRP)، مقدار مواد مقاوم‌سازی و بتن مقاومت بالا می‌باشد. نتایج آزمایشی نشان می‌دهد که استفاده از مهار انتهایی هرچند مانع شکست انتهایی اعضاء شده اما از شکست IC Debonding جلوگیری نکرده است. در صورت افزایش مقدار CFRP در تیرهای مقاوم‌سازی شده، علیرغم افزایش در ظرفیت باربری، شکل پذیری و باز پخش لنگر اعضاء بشدت کاهش می‌یابد. این در حالیست که، مقاوم‌سازی با سیستم دوگانه Hybrid GFRP-CFRP، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری تیر سراسری، دارای مقدار بازپخش لنگر رضایت بخشی خواهد بود. درصورت مقاوم‌سازی تیر هم در ناحیه ممان مثبت و هم ممان منفی، بعد از شکست اول (حداکثر بار)، در ناحیه ممان منفی یا ممان مثبت، عضو دوباره قابلیت افزایش باربری از خود نشان داده است. همچنین مشخص گردید، بمنظور تامین چرخش مفصل پلاستیک لازم و حداقل باز پخش

لنگر در تیرهای سراسری بتن مقاومت بالا مقاوم سازی شده با CFRP توامان در نواحی ممان منفی و مثبت، نباید مقدار شکل پذیری کمتر از ۳ باشد.

در نهایت یک مدل تحلیلی (تئوری) غیر خطی مبتنی بر خصوصیات مقاطع در لنگرهای مثبت ومنفی جهت پیش بینی عملکرد خمشی پیشنهاد شده است. از آنجا که در ساخت تیرها از بتن مقاومت بالا استفاده شده است، لذا ضرایب جدیدی بر اساس کرنش بتن جهت تخمین بلوک تنش معادل و محل اثر برآیند نیروهای فشاری ارائه شده و از آنها در مدل تحلیلی استفاده شده است. مقایسه نتایج آزمایشی و تئوری (تحلیلی) پیشنهادی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی غیر خطی از دقت خوبی برخوردار است. بنابراین این مدل برای مقاصد طراحی تیرهای سراسری بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با FRP قابل استفاده است.

کلمات کلیدی : تیر سراسری، بتن مقاومت بالا، CFRP، GFRP، Hybrid، IC Debomding، بازپخش لنگر، شکل‌پذیری، مدل تحلیلی غیر خطی.

تقدیم به :

همسر مهربانم که همیشه باعث دلگرمی من بوده و می‌باشد

و پدر فدا کار و مادر مهربانم که پیشرفت فرزندانشان دغدغه اصلی زندگیشان بوده و می‌باشد

و خواهران و برادران عزیزم که همواره مشوق من بوده‌اند.

ارواح بلند مهندس افضلی‌پور بنیانگذار دانشگاه کرمان و همسر فداکارشان سر کار خانم صبا

تشکر و قدردانی :

اکنون که به یاری خداوند متعال، نگارش این رساله به پایان رسیده است بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر علی اکبر مقصودی که در طول انجام این تحقیق از نظرات و راهنمایی‌های ارزنده ایشان استفاده کردم صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

از اعضای محترم هیات داوران، استادان ارجمند، آقایان پروفسور علیرضا رهائی، پروفسور فریبرز ناطقی الهی، دکتر جواد سلاجقه و دکتر سعید شجاعی سپاسگزارم که با مطالعه رساله و ارائه راهنمایی‌های ارزنده خود برای تکمیل مطالب و رفع کاستی‌های آن مرا مدیون محبت‌های خویش ساختند.

از اساتید بسیار گرامیم جناب آقای و پروفسور عیسی سلاجقه، دکتر محمد جواد فدایی، دکتر حامد صفاری و دکتر رضا رهگذر که افتخار گذراندن دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری را با ایشان داشته‌ام کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین بجاست از جناب آقایان دکتر حمید هاشمی، مهندس دریا بیگی، مهندس زاهدی مسئول آزمایشگاه سازه، مهندس شیخ اسدی، مهندس رضائی فر، مهندس ترکمان زاده و نیز همه دوستانی که در انجام آزمایش مرا یاری کردند، صمیمانه سپاسگزاری کنم.

از همسر مهربانم و گوهر تابناک وجودم یعنی پدر و مادر عزیزم بخاطر تلاش‌ها، و زحماتشان متشکرم.

از دوستان عزیزم جناب آقایان دکتر محمد سیدپور، دکتر مجید توانگری، دکتر سعید قلی زاده، دکتر احد اوریا، دکتر بهنام شفیعی و سایر دوستان عزیز نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم.

فهرست:

فصل اول: مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده

۱-۱کلیات

..... ۲

۱-۲- مروری بر تحقیقات گذشته ۴

۱-۲-۱- مقاومسازی خمشی اعضاء بتن مسلح..... ۵

۱-۲-۲- بتن مقاومت بالا ۱۳

۱-۲-۳- تیر سراسری بتن مسلح مقاوم‌سازی شده..... ۱۴

۱-۳-اهداف پایان نامه ۱۶

۱-۴-رئوس مطالب پایان نامه ۱۸

فصل دوم: معرفی کامپوزیتهای FRP وکاربرد آن در مقاوم‌سازی

۲-۱کلیات..... ۲۱

۲-۲ مزایا FRPs..... ۲۱

۲-۳- اجزای تشکیل دهنده کامپوزیتFRP..... ۲۱

۲-۴- انواع الیاف ۲۳

۲-۴-۱-الیاف کربن(Carbon Fibre) ۲۵

۲-۴-۲- الیاف شیشه(Glass Fibre) ۲۷

۲-۴-۳- الیاف آرامید (Aramid Fibre)..... ۲۸

۲-۵- رزین‌ها..... ۲۸

۲-۶- نحوه کاربرد کامپوزیت FRP ۲۹

۲-۶-۱-سیستم Wet-Lay up (چسباندن مرطوب)..... ۲۹

۲-۶-۲- سیستم پیش ساخته (Precured)..... ۳۱

۲-۶-۳- سیستم Prestressed (پیش تنیده)..... ۳۲
۲-۶-۳- سیستم نصب شده در شکاف سطح بتن Near-surface Mounted (NSM)..... ۳۳
۲-۷-مقاومسازی بر اساس عملکرد اعضاء..... ۳۳

فصل سوم: مقاوم سازی خمشی با FRP

۳-۱کلیات..... ۳۵
۳-۲- انواع حالات شکست نهایی..... ۳۷
۳-۲-۱- عملکرد کامل کامپوزیت یا شکست خمشی..... ۳۸
۳-۲-۲- عدم عملکرد کامل کامپوزیت یا شکست جداشدگی..... ۴۰
۳-۲-۲-۱ شکست ناشی از کنده شدن انتهای صفحه..... ۴۱
۳-۲-۲-۲- شکست جدا شدن توسط ترک میانی (Intermediate crack debonding)..... ۴۶
۳-۲-۳- راه جلوگیری از شکست جدا شدگی FRP..... ۴۸
۳-۳- شکل پذیری ۵۰
۳-۴- تخمین رفتار خمشی ۵۳
۳-۴-۱- مدل مقاومتی..... ۵۴
۳-۴-۲- مدل ممان-انحناء..... ۵۵
۳-۵- تیر سراسری و باز توزیع لنگر ۵۷
۳-۵-۱- بازتوزیع لنگر آئین نامه ACI38-08 ..... ۵۹
۳-۵-۲ تیر سراسری مقاوم‌سازی شده..... ۶۰

فصل چهارم: برنامه آزمایش‌ها

۴-۱- مقدمه ۶۲
٤-۲- پارامترهای متغیر ۶۲
۴-۳- خصوصیات مصالح..... ٦٣
۴-۳-۱-مواد مقاومسازی (CFRP و GFRP) و چسب..... ٦٣
۴-۳-۲- میلگرد فولادی..... ۶۴

۴-۳-۳- بتن..... ٦٥
۴-۴-جزئیات تیرهای سراسری..... ٦٧
۴-۴-۱ تیرهای بتن مسلح..... ٦٧
۴-۴-۲-برنامه مقاوم‌سازی نمونه‌ها..... ۶۸
۴-۵- مراحل مقاوم‌سازی..... ۶۹
۴-۶- نصب ابزارهای اندازه گیری دقیق و آماده‌سازی تیر برای آزمایش..... ۷۱

فصل پنجم: بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۵-۱-مقدمه..... ۷۸
۵-۲- نوع شکست تیرها ۷۸
۵-۲-۱-تیر CB..... ۷۸
۵-۲-۲ تیر SC1..... ۷۹
۵-۲-۳- تیر SC2..... ۸۱
۵-۲-۴- تیر SC3..... ۸۲
۵-۲-۵- تیر SC3N..... ۸۳
۵-۲-۶- تیر SG3..... ۸۴
۵-۲-۷- تیر SC1G1..... ۸۴
۵-۲-۸- تیر SC2G2..... ۸۵
۵-۲-۹-تیر SC2G2L..... ۸۷
۵-۳- بحث و تحلیل نتایج تیرهای گروه اول..... ۸۸
۵-۳-۱- بار-تغییر مکان..... ۸۸
۵-۳-۲-عکس العمل تکیه‌گاه میانی و کناری ۹۰
۵-۳-۳-بار-کرنش..... ۹۱
۵-۳-۴-افزایش بار جاری شدن و شکست تیرها..... ۹۶
۵-۳-۵-افزایش ظرفیت لنگر تیرها ۹۷
۵-۳-۶- باز پخش لنگر..... ۹۸
۵-۳-۷- شکل پذیری..... ۱۰۱

۵-۳-۷-۱- شکل پذیری جابجایی..... ۱۰۱
۵-۳-۷-۲-شکل پذیری انرژی..... ۱۰۳
۵-۴-بحث و تحلیل نتایج تیرهای گروه دوم..... ۱۰۴
۵-۴-۱- بار-تغییر مکان..... ۱۰۴
۵-۴-۲-عکس العمل تکیه گاه میانی و کناری..... ۱۰۵
۵-۴-۳-بار-کرنش..... ۱۰۶
۵-۴-۴-افزایش بار جاری شدن و شکست تیرها..... ۱۱۰
۵-۴-۵-افزایش ظرفیت لنگر تیرها..... ۱۱۰
۵-۴-۶- باز پخش لنگر..... ۱۱۱
۵-۴-۷-شکل پذیری..... ۱۱۲
۵-۴-۷-۱-شکل پذیری جابجایی..... ۱۱۲
۵-٤-۷-۲-شکل پذیری انرژی..... ۱۱۳
۵-۵- بررسی کرنش جدا شدگی ترک میانی (IC debonding)..... ۱۱۴

فصل ششم: مدل تحلیلی

۶-۱-مقدمه..... ۱۱۹
۶-۲- بررسی عملکرد خدمت و مقایسه با مدلهای تئوری موجود..... ۱۱۹
۶-۲-۱-بررسی و مقایسه تحلیلی و آزمایشگاهی عرض ترک خمشی..... ۱۱۹
۶-۲-۲-بررسی سختی خمشی و مقدار تغییر شکل..... ۱۲۵
۶-۲-۳- محدویت تنش در حالت خدمت..... ۱۳۲
۶-۳- مدل تحلیلی پیش بینی عملکرد خمشی..... ۱۳۳
۶-۳-۱ مدل رفتاری مواد ۱۳۵
۶-۳-۱-۱-مدل تنش-کرنش FRP..... ۱۳۵
۶-۳-۱-۲-مدل تنش-کرنش فولاد ۱۳۷
۶-۳-۱-۳-مدل تنش-کرنش بتن..... ۱۳۸
۶-۳-۲-مدل ممان-انحناء..... ۱۴۰
۶-۳-۲-۱-حالت قبل از ترک خوردگی بتن..... ۱۴۱

۶-۳-۲-۲- حالت بعد از ترک خوردگی و قبل از جاری شدن فولاد کششی..... ۱۴۲
۶-۳-۲-۳- حالت بعد از جاری شدن و قبل از سخت شدگی کرنش فولاد کششی..... ۱۴۲
۶-۳-۲-۴-حالت بعد از شروع سخت شدگی کرنش فولاد کششی..... ۱۴۲
۶-۳-۳-ترسیم نمودار ممان-انحناء ۱۴۳
۶-۳-۴- مقایسه نمودار ممان-انحناء تیرهای آزمایش شده و تحلیلی..... ۱۴۳
۶-۴-تخمین ظرفیت نهائی باربری تیرهای آزمایش شده..... ۱۴۶
۶-۵-بررسی صحت مدل تحلیلی ارائه شده..... ۱۶۸

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱-نتیجه‌گیری..... ۱۵۲
۷-۲-پیشنهادات برای کارهای آتی..... ۱۵۵

منابع و مراجع ۱۵۸

پیوست الف-برنامه کامپیوتری..... ۱۶۶
پیوست ب- مدلسازی عددی..... ۱۷۲

عناوین مقالات استخراج شده از پایان نامه..... ۱۸۱

فهرست شکلها و تصاویر:

فصل اول:

-

فصل دوم:

شکل۲-۱: نمودار تنش- کرنش الیاف پلیمری در مقایسه با فولاد معمولی ۲۳
شکل ۲-۲: مقایسه مقاومت و شکل پذیری تیرهای بتنی قبل از مقاوم‌سازی و بعد از آن..... ۲۴
شکل ۲-۳: مقایسه مقاومت و شکل پذیری ستونهای بتنی قبل از مقاوم‌سازی و بعد از آن..... ۲۴
شکل ۲-۴: الف- انواع الیاف ب- Dry fibre ج- Prepreg..... ۳۱
شکل ۲-۵: الف- نوار پیش ساخته کربنی ب- نصب نوار پیش ساخته در دال..... ۳۲
شکل ۲-۶: پیش تنیده کردن نوار پیش ساخته و نحوه نصب آن..... ۳۲
شکل۲-۷: سیستم نصب شده در شکاف سطح بتن ۳۳

فصل سوم:

شکل۳-۱: منحنی رفتاری تیر بتن آرمه در مراحل مختلف بارگذاری..... ۳۵
شکل۳-۲: مقطع طولی و عرضی تیر بتن مسلح تقویت شده با FRP ۳۶
شکل ۳-۳: منحنی بار- تغییر مکان برای تیر تقویت شده با FRP و تیر تقویت نشده..... ۳۷
شکل ۳-۴: حالتهای مختلف شکست تیر بتن مسلح تقویت شده بوسیله FRP..... ۳۹
شکل ۳-۵: سطح مقطع تیر بتنی تقویت شده بوسیله FRP..... ۴۰
شکل۳-۶: مکانیزم کنده شدن پوشش بتن..... ۴۲
شکل۳-۷: مدل بتن دندانه‌دار ۴۳
شکل۳-۸: آنالی‌ز گام ۲ با نی‌روی محوری معکوس در FRP..... ۴۴
شکل ۳-۹: مدل اجزاء محدود دو بعدی برای بلوک بتنی..... ۴۴
شکل ۳-۱۰: استفاده از گیره فولادی در انتهای ورقFRP..... ۴۹
شکل ۳-۱۱: استفاده از بست فولادی در طول ورق FRP..... ۵۰
شکل۳-۱۲: استفاده از مهار انتهاییU ۵۰

شکل ۳-۱۳: استفاده از مهار L-U در طول صفحه FRP..... ۵۰
شکل ۳-۱٤: شکل شماتیک رفتار تیر بتن مسلح مقاومسازی شده..... ۵۱
شکل ۳-۱۵: پخش تنش- کرنش و نیروهای معادل در مقطع تیر در حالت نهایی..... ۵۴
شکل ۳-۱۶: نمودار تنش کرنش بتن فشاری پیشنهاد شده توسط Hognestad ۵۶
شکل ۳-۱۷: پخش تنش- کرنش و نیروهای معادل در مقطع تیر..... ۵۶
شکل ۳-۱۸: نمودار لنگر در طول تیر بر اساس تحلیل الاستیک و رفتار واقعی..... ۵۸
شکل ۳-۱۹: مکانیسم در تیر سراسری..... ۵۸

فصل چهارم:

شکل۴-۱: الف - ستگاه یونیورسال جهت تست کشش میلگرد- ب: نمودار تنش-کرنش میلگرد فولاد..... ۶۵
شکل۴-۲: دستگاه آزمایش فشاری جهت ترسیم نمودار تنش-کرنش بتن..... ۶۶
شکل ۴-۳: نمودار تنش-کرنش بتن..... ۶۶
شکل ۴-۴: نصب کرنش سنج روی میلگرد طولی..... ۶۷
شکل۴-۵: نمائی از تیرهای ساخته شده..... ۶۸
شکل۴-۶:مشخصات تیر SC1, SC2, SC3, SC3N, SG3, SC1G1, SC2G2 ..... ۶۹
شکل ٤-۷: مشخصات تیر SC2G2L ۷۰
شکل ۴-۸: آماده سازی سطح بتن..... ۷۰
شکل ۴-۹: تمیز کردن سطح بتن توسط استون..... ۷۱
شکل ۴-۱۰: نصب FRP لایه اول بر سطح بتن..... ۷۲
شکل ۴-۱۱: استفاده از چسب رزین اپوکسی برای چسباندن لایه‌های دوم و سوم..... ۷۳
شکل ۴-۱۲: محل نصب کرنش سنج‌ها و LVDT و Load Cell..... ۷۴
شکل ۴-۱۳: تیر های سراسری آماده برای آزمایش بارگذاری..... ۷۶

فصل پنجم:

شکل ۵-۱: خرابی تیر کنترل (CB) ۷۹
شکل ۵-۲: خرابی تیر SC1 ..... ۸۰
شکل ۵-۳: خرابی تیر SC2 ..... ۸۱
شکل ۵-۴: خرابی تیر SC3..... ۸۲

شکل۵-۵: خرابی تیر SC3N ۸۳
شکل ۵-۶: خرابی تیر SG3 ..... ۸۴
شکل۵-۷: خرابی تیر SC1G1 ..... ۸۵
شکل۵-۸: خرابی تیر SC2G2..... ۸۷
شکل۵-۹: خرابی تیر SC2G2L ۸۷
شکل۵-۱۰: بار-تغییر مکان تیرهای آزمایش شد۰ گروه اول..... ۸۹
شکل۵-۱۱: نمودار بار انتقالی به تکیه گاه میانی و کناری به مجموع بار اعمالی به تیرها..... ۹۱
شکل ۵-۱۲: نمودار مجموع باراعمالی به کرنش FRP و کرنش فشاری بتن در الف- تکیه‌گاه میانی ب- وسط دهانه..... ۹۲
۵-۱۳- نمودار مجموع بار اعمالی به کرنش در FRP و فولاد کششی مجاور آن در تیرهای SC1، SC3N و SG3..... ۹۳
شکل ۵-۱۴: نمودار مجموع بار اعمالی به کرنش در مهار انتهایی U برای تیر SC3..... ۹۴
شکل ۵-۱۵: پروفیل کرنش FRP در طول تیرهای آزمایش شده گروه اول..... ۹۶
شکل ۵-۱۶: نمودار مجموع بار اعمالی به لنگر منفی (تکیه گاه میانی) و لنگر مثبت (وسط دهانه) برای تیرهای گروه اول..... ۹۷
شکل۵-۱۷: تاثیر مقدار CFRP بر باز پخش لنگر..... ۱۰۱
شکل ۵-۱۸: شکل شماتیک رفتار بار-جابجایی تیر بتن مسلح مقاوم‌سازی شده..... ۱۰۲
شکل ۵-۱۹: تاثیر CFRP روی شکل پذیری جابجایی تیرها..... ۱۰۳
شکل۵-۲۰: مقایسه شکل پذیری انرژی در تیرهای گروه اول..... ۱۰۴
شکل۵-۲۱: بار-تغییر مکان تیرهای سراسری گروه دوم..... ۱۰۵
شکل ۵-۲۲: نمودار بارتحمل شده توسط تکیه گاه نسبت به مجموع بار اعمال شده در تیرهای گروه دوم..... ۱۰۶
شکل ۵-۲۳: نمودار مجموع باراعمالی به کرنش FRP و کرنش فشاری بتن در الف- تکیه‌گاه میانی ب- وسط دهانه تیرهای گروه دوم..... ۱۰۷
۵-۲۴: نمودار مجموع بار اعمالی به کرنش در FRP و فولاد کششی مجاور آن در تیرهای سراسری SC1، SG3 و SC1G1..... ۱۰۸
شکل ۵-۲۵: پروفیل کرنش FRP در طول تیرهای آزمایش شده گروه دوم..... ۱۰۹

شکل ۵-۲۶: نمودار مجموع بار اعمالی به لنگر منفی (تکیه گاه میانی) و لنگر مثبت (وسط دهانه) برای تیرهای گروه دوم..... ۱۱۱
شکل ۵-۲۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده بر کرنش یا تنش جداشدگی ترک میانی..... ۱۱۶

فصل ششم:

شکل ۶-۱: الف- تاثیر مقاوم‌سازی با CFRP روی عرض ترک ب- تاثیر مقاومسازی با GFRP و Hybrid CFRP/GFRP روی عرض ترک..... ۱۲۰
شکل ۶-۲: مقایسه عرض ترک آزمایشگاهی و تئوری..... ۱۲۵
شکل۶-۳: الف-تاثیر مقاوم‌سازی با CFRP و GFRP روی سختی خمشی تیرهای آزمایش شده ب- تاثیر مقاوم‌سازی با Hybrid CFRP/GFRP روی سختی خمشی تیرهای آزمایش شده.... ۱۲۷
شکل ۶-۴: مقطع ترک خورده..... ۱۲۷
شکل ۶-۵: مقایسه خیز آزمایشگاهی و تئوری تیرهای آزمایش شده ۱۳۲
شکل ۶-۶: نمودار شماتیک ممان-انحناء ۱۳۵
شکل ۶-۷: نمودار تنش-کرنش FRP..... ۱۳۶
شکل ۶-۸: نمودار تنش-کرنش فولاد..... ۱۳۷
شکل ۶-۹: مقایسه مدلهای تئوری، پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی تنش-کرنش بتن مقاومت بالا..... ۱۳۸
شکل ۶-۱۰: مقایسه نمودار ممان-انحناء آزمایشگاهی و تحلیلی تیرهای آزمایش شده..... ۱۴۶
شکل ۶-۱۱: مقایسه ظرفیت باربری نهایی آزمایشگاهی و مدل تحلیلی..... ۱۴۸
شکل ۶-۱۲: مقایسه ظرفیت باربری نهایی آزمایشگاهی و تئوری پیشنهادی تیرهای آزمایش شده توسط Ashour و همکاران (۲۰۰۴) و Grace و همکاران (۲۰۰۴)..... ۱۵۰

فهرست جداول:

فصل اول:

-

فصل دوم:

جدول ۲-۱: چگالی مواد FRP رایج برحسب گرم بر سانتی متر مکعب..... ۲۴

جدول۲-۲: ضریب انبساط حرارتی مواد FRP..... ۲۵

جدول ۲-۳: مشخصات مکانیکی انواع الیاف..... ۲۵

جدول ۲-۴: مقایسه مشخصات رزین اپوکسی، بتن و فولاد..... ۲۹

فصل سوم:

-

فصل چهارم:

جدول ۴-۱: مشخصات مکانیکی CFRP و GFRP..... ۶۳

۴-۲: مشخصات چسب ۶۴

جدول ۴-۳: طرح اختلاط بتن($1m^3$)..... ۶۵

جدول ۴-۴- مشخصات تیرهای آزمایش ۷۱

فصل پنجم:

جدول ۵-۱: نتایج آزمایش تیرهای سراسری بارگذاری شده، شامل بار جاری شدن و نهایی، و تغییر شکل وسط دهانه و کرنش نهایی FRP..... ۸۸

جدول ۵-۲: مقدار عکس العمل تکیه گاه میانی، لنگر شکست و بازپخش لنگر در تیرهای آزمایش شده..... ۹۹

جدول ۵-۳: مقایسه شکل پذیری جابجایی و جذب انرژی..... ۱۰۳

جدول ۵-۴: مقایسه شکل پذیری انرژی با شکل پذیری جابجای..... ۱۱۳

جدول ۵-۵: شکل پذیری انرژی و جابجایی تیرهای آزمایش شده توسط El-Refaie و همکاران (b۲۰۰۳).....۱۱۴
جدول ۵-۶: مشخصات و کرنش (تنش) جداشدی ترک میانی تیرها و دال‌های سراسری آزمای شده توسط Ashour و همکاران (۲۰۰۴) و Liu و همکاران (۲۰۰۶).....۱۱۵
جدول ۵-۷: مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مقدار محاسبه شده کرنش یا تنش جدا شدگی ترک میانی تیرهای سراسری مقاوم‌سازی شده ۱۱۶
جدول ۵-۸: مقدیر آماری نسبت کرنش یا تنش جداشدگی ترک میانی آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده.....۱۱۷

فصل ششم:

جدول ۶-۱: مقادیر تنش و کرنش فولاد، FRP در مقادیر مختلف حدی عرض ترک.....۱۲۱
جدول ۶-۲: کرنش و تنش بتن و FRP در بار خدمت.....۱۳۳
جدول ۶-۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل تحلیلی (تئوری).....۱۴۸
جدول ۶-۴: جزییات تیرهای بتن مسلح سراسری آزمایش شده توسط Ashour و همکاران (۲۰۰۴) و Grace و همکاران (۲۰۰۴).....۱۴۹
جدول ۶-۵: مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری پیشنهادی تیرهای آزمایش شده توسط Ashour و همکاران (۲۰۰۴) و Grace و همکاران (۲۰۰۴) ۱۵۰

فصل اول:

مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده

۱-۱کلیات

سازه های بتنی ممکن است به دلایل مختلفی دچارآسیب شده و نیاز به مرمت، تقویت ویا بهسازی داشته باشند. این آسیبها از دو بعد ماده و سازه مطرح میباشند. آسیب ماده در سازه‌های بتنی در مواردی همچون خوردگی فولاد و یا فساد وخرابی بتن مطرح میشود که با استفاده از روشهای مخصوص به خود و مواد تعمیراتی مانند انواع دوغاب و ... قابل ترمیم میباشند که البته بحث آسیب ماده موضوع مورد بحث در این پروژه نیست. اما آسیب سازه ای یک سازه بتنی درموارد متعددی مطرح میباشد که درزیر به اختصار چندین مورد توضیح داده میشود.

نیروی زلزله

با توجه به اینکه کشور ما در منطقه ای زلزله خیز واقع است و این امکان وجود دارد که در طراحی بسیاری از سازه ها که درسالهای گذشته انجام گرفته، نیروی زلزله به درستی در نظر گرفته نشده باشد لذا تعداد زیادی از سازه ها نیاز به تقویت و مقاوم سازی دربرابر نیروی زلزله دارند. تقویت سازه برای مقابله با ارتعاشات ونیروهای وارده دراثر زلزله با روشهای مختلف و جدید از مباحث نسبتاً تازه درمحافل علمی است.

تغییر کاربری سازه

دربسیاری موارد ممکن است بحث تغییر کاربری یک سازه بعنوان مثال از مسکونی به اداری یا تجاری و ... مطرح باشد، با فرض اینکه سازه درمرحله طراحی خود به درستی طراحی شده وتمام نکات منجمله انواع بارها بخصوص بار زلزله درنظر گرفته شده باشد. لیکن سازه با کاربری جدید تحت بارگذاری های جدیدی قرارگیرد که درکاربری قبلی مطرح نبوده‌است. بنابراین دربحث تغییر کاربری سازه ها نیز موضوع تقویت و ترمیم سازه‌های بتنی مطرح می‌شود.

عدم رعایت ضوابط اجرایی

درصورت طراحی مناسب و درست سازه، این امکان وجود دارد که سازه در مرحله اجرا به درستی و همانگونه که محاسبه و طراحی شده، اجرا نشود و اشکالات متعددی همچون آرماتوربندی نادرست، کاربرد میلگرد با قطر و تعداد نامناسب، عدم رعایت طول مهاری‌های لازم برای میلگرد، عدم اجرای درست اتصالات، عدم طراحی اتصالات (که متاسفانه در بسیاری از آئین‌نامه‌ها این موضوع همچنان مسکوت است)، استفاده از سیمان نامناسب، عدم استعمال سیمان به مقدار کافی و