بسم الله الرحمن الرحيم

فرم شماره۱۴

دانشکده..... فنی .....

پایان نامه آقای/خانم ..... به شماره دانشجویی .....

..... با عنوان ..... به

تاریخ ..... و شماره ثبت ..... شماره ..... مورد پذیرش

هیات محترم داوران با رتبه ..... عالی ..... و نمره ..... ۱۹ ..... قرار گرفت.

کمیته دفاع	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱)استاد راهنما و رئیس هیات داوران	دکتر حسین رشتی	
۲)استاد راهنمای دوم	ـــــ	ـــــ
۳)استاد مشاور (در صورت وجود)	ـــــ	ـــــ
۴)داور خارجی	دکتر محمدرضا شیدایی	
۵)داور داخلی	دکتر هیلدا غیرتمند	
۶) نماینده تحصیلات تکمیلی		

حق چاپ و نشر برای دانشگاه ارومیه محفوظ می باشد.

دانشکده فنی و مهندسی

گروه عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران– سازه

موضوع:

بررسی آزمایشگاهی تاثیر تقویت بال کششی تیرورقهای پلهای فولادی با CFRP با ناکاملی اولیه در بال کششی

استاد راهنما :

دکتر حسین شوکتی

اساتید داور:

دکتر محمدرضا شیدایی **دکتر چنگیز غیرتمند**

تنظیم ونگارش :

قاسم طلوعی اردلانی

بهمن ماه ۱۳۹۰

حق چاپ برای دانشگاه ارومیه محفوظ است.

تقدیم به **پدرم**

کوهی استوار و حامی من در طول تمام زندگی

تقدیم به **مادرم**

سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. اینک که کار نگارش این پایان نامه به پایان رسیده است، بجاست از تمامی عزیزانی که هر یک به نوعی یاریگر تهیه و تدوین آن بوده اند تشکر و قدردانی شود.

بسی شایسته است از استاد گرانقدرم، جناب آقای دکتر حسین شوکتی، تقدیر و تشکر نمایم و زحمات ایشان را ارج مینهم که با صبر و حوصله بسیار مرا در مسیر این پایان نامه هدایت فرمودند.

همچنین از پدر و مادر عزیز، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم، سپاسگزاری نمایم.

و با سپاس بی دریغ خدمت دوستان گران مایه ام آقایان هادی اسماعیلی، مجتبی نیک آذر و دیگر عزیزانی که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده اند.

فهرست

فهرست شکل ها ..... ث
فهرست جداول ..... د
چکیده ..... ذ
فصل اول: پیشگفتار ۱
۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق ۲
۱-۳- روش های مقاوم سازی ۲
۱-٤- اهداف تحقیق ٤
۱-٥- رویکرد و روش انجام کار ٤
۱-٦- محدوده مورد مطالعه ٥
۱-۷- چارچوب فصول تحقیق ٥
فصل دوم: ادبیات موضوع و سابقه تحقیق ٦
۲-۱- مقدمه ٦
۲-۲- تیرورق ٦
۲-۳- مصالح کامپوزیت ۱۰
۲-۳-۱- کامپوزیت FRP ۱۱
۲-۳-۲- ماتریس FRP ۱۲
۲-۳-۳- فیبر FRP ۱۳
۲-۳-٤- مزایای کلی استفاده ازFRP ۱۹
۲-۳-٥- محدودیت ها : ۱۹
۲-٤- سابقه تحقیق ۲۱
۲-٤-۱- کارهای اجرایی و عملی ۲۱
۲-٤-۲- تحقیقات دانشگاهی ۲٥
۲-٥- خلاصه فصل دوم ۳٤
فصل سوم: طراحی و مشخصات سیستم آزمایشات ۳٤
۳-۱- مقدمه ۳٤
۳-۲- مشخصات نمونهها ۳٤
۳-۳- آماده سازی نمونههای آزمایشگاهی ۳۸
۳-۳-۱- آماده سازی تیرورقها ۳۸
۳-۳-۲- آماده سازی سطوح و چسباندن لمینیتها ٤۲
۳-۴- سیستم بارگذاری و روش بارگذاری ٤٦
۳-٤-۱- سیستم بارگذاری ٤٦

۳-٤-۱-۱-جک بارگذاری..... ٤٦
۳-٤-۲-روش بارگذاری..... ٤٩
۳-٥- تجهیزات اندازه گیری و برداشت دادهها ٤٩
۳-٥-۱-لود سل (Load Cell) ٤٩
۳-٥-۲- تغیرمکان سنجها (LVDT) ٤٩
۳-٥-۲-کرنش سنجها (Strain Gages) ٤٩
۳-٥-۲-دیتالاگر (Data Logger) ٥٠
۳-٦- مشخصات مصالح..... ٥١
۳-٦-۱-مشخصات فولاد ٥١
۳-٦-۲-مشخصات CFRP..... ٥۳
۳-٦-۳-مشخصات چسب..... ٥۳
۳-۷- خلاصه فصل سوم ٥٤
فصل چهارم: مدل سازی به روش المان محدود و تئوریهای تیرورق ٥٥
٤-۱- مدل سازی به روش المان محدود ٥٥
۴-۱-۱- مقدمه ٥٥
٤-۱-۲- شبیه سازی در نرم افزار ABAQUS ٥٦
۴-۲- ضوابط طراحی تئوریهای تیرورق..... ۷۸
٤-۲-۱- مقدمه ۷۸
٤-۲-۲- ضوابط LRFD ۷۹
٤-۲-۲- مقاومت خمشی..... ۸۲
٤-۳- تئوری ها و سایر آئین نامه ها..... ۸۲
٤-۳-۱- مقاومت کمانشی..... ۸۲
٤-۳-۲- مقاومت نهایی..... ۸۳
۴-۴- محاسبه افزایش سختی سیستم بوسیله CFRP..... ۸٤
۴-۶- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی..... ۸٦
۴-۷-خلاصه فصل چهارم ۸۷
فصل پنجم: گزارش آزمایشات..... ۸۸
۵-۱- مقدمه ۸۸
۵-۲- دسته بندی نمونههای آزمایشگاهی..... ۸۹
۵-۲-۱-نسبت سطح مقطع ۱.۵ ..... ۸۹
۵-۲-۱-۱-نمونه اول بدون لمینیت CFRP..... ۸۹
۵-۲-۲-نسبت سطح مقطع ۲ ..... ۱۰۰

۲-۵- خلاصه فصل پنجم..... ۱۰۸
فصل ششم: بررسی نمودارها و نتایج..... ۱۰۹
۶-۱- مقدمه..... ۱۰۹
۶-۲- نتایج و نمودارهای ترکیبی برای نمونههای آزمایشگاهی..... ۱۱۰
۶-۲-۱- نمودارهای نیرو- تغییرمکان قائم نمونه های تقویت شده با CFRP..... ۱۱۰
۶-۲-۲- نمودارهای نیرو- کرنش نمونه های تقویت شده با CFRP..... ۱۱۵
۶-۲-۳- بررسی اثر افزایش سطح مقطع بال فشاری به بال کششی در ظرفیت نهایی..... ۱۱۹
٦-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی..... ۱۲۰
٦-۳-۱- نمودارهای نیرو- تغییرمکان قائم نمونه های تقویت شده با CFRP..... ۱۲۰
۶-۳-۲- نمودارهای نیرو- کرنش نمونه های تقویت شده با CFRP..... ۱۲٤
۶-۴- مقایسه نتایج..... ۱۲۹
۶-۴-۱- مقایسه مقدار افزایش ظرفیت نهایی نمونه های آزمایشگاهی و عددی..... ۱۲۹
۶-۴-۱- مقایسه مقدار ظرفیت نهایی نمونه های آزمایشگاهی و عددی با آئین نامه AISC LRFD..... ۱۳۰
۶-۴-۲- مقایسه آزمایشگاهی، عددی و تئوری افزایش سختی نمونه ها بعد از اتصال CFRP..... ۱۳۱
۶-۵- ناکاملی در بال کششی..... ۱۳۲
۶-۵- خلاصه فصل ششم..... ۱۳٤
فصل هفتم: نتیجه گیری..... ۱۳٥
۷-۱- مقدمه..... ۱۳٥
۷-۲- نتایج بدست آمده از انجام تحقیق..... ۱۳۷
۷-۴- پیشنهادات برای تحقیقات آینده..... ۱۳۹
مراجع..... ۱٤۰

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱- تیرورق با سخت کننده های متفاوت ۷
شکل۲-۲- انواع کمانش و ناپایداری تیرورق ها ۸
شکل۲-۳- عمل میدان کششی تیرورق ۸
شکل۲-۴- تیرورق با جان کمانش یافته ۱۰
شکل۲-۵- ورقه FRP ساخته شده ازفیبرهای ناهمسانگرد یکطرفه ۱۱
شکل۲-۶- مقایسه رفتار تنش- کرنش فولاد با انواع FRP ۱۳
شکل۲-۷- جهت قرارگیری فیبرها ۱۴
شکل۲-۸- الیاف GFRP ۱۵
شکل۲-۹- لمینیت CFRP ۱۶
شکل۲-۱۰- فیبر کربن و کولار یک جهته ۱۶
شکل۲-۱۱- پل تقویت شده Ashland ۲۱
شکل۲-۱۲- پل تقویت شده Hythe ۲۲
شکل۲-۱۳- پل تقویت شده Slattocks canal ۲۳
شکل۲-۱۴- پل تقویت شده Pottawattamie county ۲۴
شکل۲-۱۵ مقطع فولادی I شکل متقارن ۲۶
شکل۲-۱۶- روش های تقویت بال کششی ۲۷
شکل۲-۱۷- نمودار بار تغییر شکل برای هر ۵ نمونه ۲۸
شکل۲-۱۸- شمای کلی نمونه‌ی تقویت شده ۲۹
شکل۲-۱۹- مقطع نمونه‌های تقویت شده ۲۹
شکل۲-۲۰- تست خمش سه نقطه‌ای ۳۰
شکل۲-۲۱- نمودار بار تغییر شکل قائم ۳۲
شکل ۳-۱- شکل کلی نمونه‌ها با و بدون CFRP ۳۵
شکل۳-۲- تیرورق با حالت بدون سخت کننده کناری در انتها ۳۵
شکل۳-۳- ابعاد مقطع نمونه و محل کرنش سنج‌ها در کلیه نمونه‌ها ۳۶
شکل۳-۴- جوشکاری نمونه و دستگاه اتوماتیک جوش آرگون ۳۶
شکل۳-۵- نحوه اسمبل کردن نمونه‌ها ۴۰

شکل۳-۶- خط جوش‌ها به صورت نقطه‌ای ۴۰
شکل۳-۷- شمای کلی نمونه‌ها در حین ساخت ۴۱
شکل۳-۸- شمای کلی نمونه بعد از رنگ آمیزی ۴۱
شکل۳-۹- سائیدن سطح بال کششی توسط دیسک‌های تراشنده ۴۳
شکل۳-۱۰- سائیدن سطح لمینیتCRFP با کاغذ سمباده ۴۳
شکل۳-۱۱- نسبت وزنی رزین و سخت کننده ۴۴
شکل۳-۱۲- نحوه پخش لایه چسب بر روی سطح ۴۴
شکل ۳-۱۳– قرار دادن تکه‌های چوب جهت ایجاد فشار یکنواخت در لایه چسب ۴۵
شکل۳-۱۴-محل نگهداری نمونه‌ها بعد از چسباندن لمینیت‌هایCRFP ۴۵
شکل ۳-۱۵-الف موتور اعمال نیرو ۴۶
شکل ۳-۱۵-ب دستگاه کنترلی بار ۴۶
شکل ۳-۱۵-ج- جک هیدرولیکی بهمراه نیرو سنج ۴۶
شکل ۳-۱۵-د- تکیه گاه صلب جک هیدرولیکی ۴۶
شکل ۳-۱۶- شمای کلی تکیه گاه مفصلی و غلطکی ۴۷
شکل ۳-۱۷-الف- سیتم مهاربندی نمونه‌ها ۴۸
شکل ۳-۱۷-ب- روش مهار جانبی ۴۸
شکل۳-۱۸-الف-لودسل و طریقه اتصال آن به جک هیدرولیکی ۵۰
شکل ۳-۱۸-ب-LVDT ۵۰
شکل ۳-۱۸-ج- نصب کرنش سنج جان ۵۰
شکل ۳-۱۸-د- دیتالاگر مورد استفاده در آزمایشگاه ۵۱
شکل ۳-۱۹-نمونه‌های تست کشش بعد از انجام تست ۵۲
شکل ۳-۲۰- دستگاه تست کشش ۵۲
شکل ۳-۲۱-شمای کلی نمونه آماده تست ۵۴
شکل ۴-۱- تفاوت پوسته ای متداول و پیوسته ۶۰
شکل۴-۲- خواص پلاستیک فولاد ۶۱
شکل۴-۳- ورقه تک جهته ۶۲
شکل۴-۴- تعریف مقطع CFRP ۶۶
شکل۴-۵- مدل Assembly شده ۶۷
شکل۴-۶- پاسخ کششی- جداشدگی ۷۱
شکل۴-۷- تکیه گاه ها در مدل المان محدود ۷۵
شکل۴-۸- بارگذاری و جهت ها ۷۵
شکل ۴-۹- مش بندی المان محدود تیرورق ۷۷
شکل۴-۱۰- مقطع تیرورق تقویت شده با CFRP در وسط دهانه ۸۴

شکل ۴-۱۱-فایل Excel مربوط به ابعاد نمونه‌ی S۲ و کنترل ضوابط آئین نامه AISC LRFD ۸۶
شکل ۴-۱۲-شکل کلی نمونه‌ها بعد از طراحی ۸۶
شکل ۵-۱-تغییر مکان سنج‌ها جهت برداشت تغییر مکان قائم ۸۹
شکل ۵-۲- محل کرنش سنج ها ۹۰
شکل ۵-۳- محل کرنش سنج‌ها و تغییر مکان سنج‌ها ۹۰
شکل ۵-۴-مود شکست نمونه واقعی ۹۱
شکل ۵-۵- مود شکست نمونه شبیه سازی شده ۹۱
شکل۵-۶- نمودار نیرو- تغییر مکان قائم ۹۲
شکل ۵-۷- محل قرار گیری کرنش سنج‌ها ۹۳
شکل ۵-۸- محل تغییر مکان سنج‌ها و کرنش سنج‌ها در نمونه S۵ ۹۳
شکل ۵-۹- خرابی نمونه با ایجاد مفصل‌های پلاستیک ۹۴
شکل ۵-۱۰-عمل خرپایی در جان تیرورق ۹۵
شکل ۵-۱۱- مود خرابی نمونه شبیه سازی شده در نرم‌افزار ۹۵
شکل۵-۱۲- نمودار نیرو- تغیر مکان قائم ۹۶
شکل ۵-۱۳- محل قرار گیری کرنش سنج‌ها ۹۷
شکل ۵-۱۴- مفصل‌های پلاستیک پلکانی ۹۸
شکل ۵-۱۵-کمانش جان تیرورق و ایجاد مفصل پلاستیک ۹۹
شکل ۵-۱۶-مود شکست نمونه شبیه سازی شده ۹۹
شکل۵-۱۷- نمودار نیرو- تغیر مکان قائم ۱۰۰
شکل ۵-۱۸-محل کرنش سنج‌ها و تغییر مکان سنج‌ها ۱۰۱
شکل ۵-۱۹- مود شکست نمونه واقعی ۱۰۲
شکل۵-۲۰- نمودار نیرو- تغییر مکان قائم ۱۰۲
شکل ۵-۲۱-عدم وجود نقطه جوش کافی در سخت کننده و کمانش آن ۱۰۴
شکل ۵-۲۲- مود شکست نمونه واقعی ۱۰۴
شکل ۵-۲۳- مود خرابی نمونه‌ی شبیه سازی شده ۱۰۵
شکل۵-۲۴- نمودار نیرو- تغییر مکان قائم ۱۰۵
شکل ۵-۲۵- مود شکست نمونه واقعی ۱۰۷
شکل ۵-۲۶- مود شکست نمونه شبیه سازی شده ۱۰۷
شکل۵-۲۷- نمودار نیرو- تغییر مکان قائم ۱۰۸
شکل ۶-۱-نمودار نیرو-تغییر مکان قائم در مرکز دهانه،بر روی بال کششی ۱۱۰
شکل ۶-۲- نمودار نیرو-تغییر مکان قائم در نقطه‌ای بر روی بال فوقانی ۱۱۱
شکل ۶-۳-نمودار نیرو-تغییر مکان قائم در مرکز دهانه،بر روی بال کششی ۱۱۲
شکل ۶-۴-نمودار نیرو-تغییر مکان قائم در نقطه‌ای بر روی بال فوقانی ۱۱۲
شکل ۶-۵-نمودار نیرو-تغییر مکان قائم بر روی بال کششی ۱۱۴

شکل ۶-۶-نمودار نیرو-تغییر مکان قائم بر روی بال فشاری ۱۱۴
شکل ۶-۷-نمودار نیرو-کرنش در نقطه‌ای بر روی بال فشاری ۱۱۵
شکل ۶-۸-نمودار نیرو-کرنش درجان تیرورق در جهت مورب ۱۱۶
شکل ۶-۹-نمودار نیرو-کرنش در نقطه‌ای بر روی سطح بالایی بال کششی ۱۱۶
شکل ۶-۱۰-نمودار نیرو-کرنش در نقطه‌ای بر روی سطح لمینیت CFRP ۱۱۶
شکل۶-۱۱- نمودار نیرو-کرنش در نقطه‌ای بر روی بال فشاری ۱۱۷
شکل ۶-۱۲-نمودار نیرو-کرنش درجان تیرورق در جهت مورب ۱۱۸
شکل۶-۱۳- نمودار نیرو-کرنش در مرکز دهانه بر روی بال کششی ۱۱۸
شکل ۶-۱۴-نمودار درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها ۱۱۹
شکل۶-۱۵-نمودار نیرو-تغییرمکان قائم در مرکز دهانه بر روی بال کششی ۱۲۱
شکل۶-۱۶-نمودار نیرو-تغییرمکان قائم بر روی بال فشاری ۱۲۱
شکل ۶-۱۷-نمودار نیرو-تغییرمکان قائم بر روی بال کششی ۱۲۱
شکل۶-۱۸-نمودار نیرو-تغییرمکان قائم بر روی بال فشاری ۱۲۲
شکل ۶-۱۹-نمودار نیرو-تغییرمکان قائم بر روی بال کششی ۱۲۲
شکل۶-۲۰-نمودار نیرو-تغییر مکان قائم بر روی بال فشاری ۱۲۳
شکل ۶-۲۱- نمودار نیرو-تغییرمکان قائم بر روی بال کششی ۱۲۳
شکل ۶-۲۲- نمودار نیرو-تغییرمکان قائم بر روی بال فشاری ۱۲۳
شکل ۶-۲۳-نمودار نیرو-کرنش بر روی سطح بالایی بال فشاری برای ۷۰٪ CFRP ۱۲۴
شکل ۶-۲۴- نمودار نیرو-کرنش در جان تیرورق در جهت مورب برای ۷۰٪ CFRP ۱۲۵
شکل ۶-۲۵- نمودار نیرو-کرنش در سطح فوقانی بال کششی برای ۷۰٪ CFRP ۱۲۵
شکل۶-۲۶-نمودار نیر-کرنش در سطح بالایی بال فشاری برای ۹۰٪ CFRP ۱۲۵
شکل ۶-۲۷-نمودار نیرو-کرنش در جان تیرورق در جهت مورب برای ۹٪ CFRP ۱۲۶
شکل ۶-۲۸- نمودار نیرو-کرنش در سطح فوقانی بال کششی برای ۹۰٪ CFRP ۱۲۶
شکل ۶-۲۹-نمودار نیرو-کرنش بر روی سطح بالایی بال فشاری برای ۷۰٪ CFRP ۱۲۷
شکل ۶-۳۰- نمودار نیرو-کرنش در جان تیرورق در جهت مورب برای ۷۰٪ CFRP ۱۲۷
شکل ۶-۳۱- نمودار نیرو-کرنش در سطح فوقانی بال کششی برای ۷۰٪ CFRP ۱۲۷
شکل۶-۳۲-نمودار نیر-کرنش در سطح بالایی بال فشاری برای ۹۰٪ CFRP ۱۲۸
شکل ۶-۳۳-نمودار نیرو-کرنش در جان تیرورق در جهت مورب برای ۹٪ CFRP ۱۲۸
شکل ۶-۳۴- نمودار نیرو-کرنش در سطح فوقانی بال کششی برای ۹۰٪ CFRP ۱۲۸
شکل ۶-۳۵-نمودار مقایسه درصد افزایش ظرفیت نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی و المان محدود ۱۳۰
شکل ۶-۳۶- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی با آئین نامه ۱۳۱
شکل ۶-۳۷ نمودار مقایسه درصد افزایش سختی نمونه‌ها در حالات آزمایشگاهی، عددی و تئوری ۱۳۲
شکل ۶-۳۸ میزان افت ظرفیت ناشی از ناکاملی ۱۳۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱- مقایسه انواع فیبرهای FRP ۱۷
جدول۲-۲- مقایسه خصوصیات مکانیکی نمونه های مختلف کامپوزیت FRP ۱۷
جدول ۳-۱-مشخصات مربوط به نمونه‌های آزمایشی ۳۶
جدول ۳-۲-ابعاد اجزای تیرورق‌ها ولمینیت‌های CFRP به سانتی‌متر ۳۹
جدول ۳-۳-مشخصات مصالح تعیین شده توسط تست کشش ۵۲
جدول ۳-۴-مشخصات لمینیت‌های CFRP ۵۳
جدول ۳-۵- مشخصات و ویژگیهای چسب مصرفی ۵۳
جدول۴-۱- مشخصات مقطع تقویت شده خمشی(cm) ۸۴
جدول ۶-۱-تغییرات سختی نمونه‌های آزمایشگاهی ۱۱۳
جدول ۶-۲- درصد افزایش ظرفیت نهایی ۱۱۹
جدول۶-۳-میزان افزایش ظرفیت نهایی آزمایشگاهی و المان محدود ۱۲۹
جدول۶-۴- مقایسه عددی، آئین نامه و آزمایشگاهی ظرفیت نهایی نمونه های بدون تقویت ۱۳۰
جدول ۶-۵-مقایسه درصد افزایش سختی بدست آمده از آزمایشگاه، نرم افزار و تئوری ۱۳۱
جدول ۶-۶- مقایسه ظرفیت نهایی نمونه های ناکامل و اصلی ۱۳۳

چکیده

تیرورق‌ها یکی ازاجزای سازه‌ای هستند که به منظور تامین کارایی بهتر از ورق ساخته می‌شوند. تیرورق‌ها را می‌توان با اتصالات پیچی و یا جوشی ایجاد کرد، از سال ۱۹۵۰ تهیه تیرورق از ترکیب سه ورق جایگزین روش‌های قبلی شد. در حال حاضر تعداد بسیار زیادی از پل‌های فلزی در دنیا وجود دارد که طی سالیان زیاد در معرض شرایط محیطی کارایی خود را از دست داده‌اند و نیاز به ترمیم و بازسازی دارند. بازسازی آنها به روشهای مختلفی می‌تواند انجام گیرد. روشهایی از قبیل تعویض تیرهای معیوب، محدود کردن بارگذاری پلها، یا اضافه کردن تیری دیگر به آنها که به لحاظ اقتصادی مناسب نمی‌باشد. در میان انواع روش های مقاوم سازی، تقویت عضو آسیب دیده با مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف FRP، از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشد، کامپوزیت های FRP با داشتن ویژگی های ممتاز چون نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام در برابر خوردگی و سرعت و سهولت در حمل و نصب که نگهداری و مراقبت آن را نیز بعد از اجرا آسانتر می‌نماید، دریچه ای نو پیش روی مهندسین عمران گشوده است. در این پایان نامه، شش نمونه‌ی آزمایشگاهی از تیرورق های با اندازه واقعی که با مقیاس کوچک شده‌اند، با توجه به دو متغیر نسبت سطح مقطع بال فشاری به بال کششی و طول CFRP، آماده و آزمایش گردیدند. و تاثیر این نوع تقویت به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی می‌شود. نرم افزار المان محدود ABAQUS برای انجام آنالیزهای عددی بکار رفته است. در نهایت نتایج آزمایش افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت الاستیک و ظرفیت نهایی مقطع را نشان می‌دهند. روشهای تحلیلی نیز صحت آن را تأیید می‌کنند.

فصل اول

پیشگفتار

۱–۱– مقدمه

با توجه به این که بیشتر پل‌های موجود در جهان از مقاطع فولادی نورد شده و تیرورق‌ها ساخته شده‌اند که با گذشت عمرشان نیاز به بازسازی و ترمیم دارند. تیرورق‌ها یکی ازاجزای سازه‌ای هستند که به منظور تامین کارایی بهتر از ورق ساخته می‌شوند. تیرورق‌ها را می‌توان با اتصالات پیچی و یا جوشی ایجاد کرد، از سال ۱۹۵۰ تهیه تیرورق از ترکیب سه ورق جایگزین روش‌های قبلی شد. در حال حاضر تعداد بسیار زیادی از پل‌های فلزی در دنیا وجود دارد که طی سالیان زیاد در معرض شرایط محیطی کارایی خود را از دست داده‌اند و نیاز به ترمیم و بازسازی دارند. سرعت تخریب پل ها و عملکرد آن ها با عمر طولانی، در دو دهه گذشته بین محققان به طور مفصل بحث شده است. در این راستا، بحث مقاوم سازی و بهسازی این عناصر سازه ای، در دهه اخیر توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است؛ در میان انواع روش های مقاوم سازی، تقویت عضو آسیب دیده با مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP)، از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشد. تا آنجا که به نظر برخی از متخصصان، FRP را باید مصالح ساختمانی هزاره سوم نامید. کامپوزیتFRP که ابتدا در صنایع هوا و فضا بکار برده می شد با داشتن ویژگی های ممتاز چون نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام در برابر خوردگی، سرعت و سهولت در حمل و نصب که نگهداری و مراقبت آن را نیز بعد از اجرا آسانتر می‌نماید، دریچه ای نو پیش روی مهندسین عمران گشوده است. به عبارت دیگر استفاده از مواد CFRP هزینه‌ها را در حالت کلی کاهش می‌دهد. این کاهش در هزینه ها از طریق تقویت موقیعت‌های مختلف اعضا در زمانهای مناسب و همچنین اضافه کردن بار مرده بسیار کم به عضو سازه‌ای

می‌باشد که این‌ها در حالت کلی با توجه به قیمت بالای CFRP در کل هزینه تقویت را پایین می‌آورد. امروزه سازه های متعددی در سرتاسر دنیا با استفاده از این مواد تقویت شده اند؛ استفاده از مصالح کامپوزیت به طور قابل توجهی در صنعت ساختمان با سرعت در حال توسعه می باشد. در مجامع علمی نیز تحقیقات متنوعی روی آن در حال انجام است.

۱-۲- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

در طی ۴۰ سال گذشته اتحادیه حمل و نقل ایالتی آمریکا(AASHTO)[۱] و اداره راه فدرال(FHWA)[۲]، برنامه ای برای بازرسی سالانه پل ها، تدوین کرده است. در طی این بازرسی ها معلوم شد که یک سوم پل های شاهراه ها در این کشور زیر استاندارد هستند. طبق آخرین اعلام نشریه ملی پل(NBI)[۳] در این کشور، تعداد ۸۱۰۰۰ پل در سطح این کشور در شاهراه ها موجود است و ۴۳ ٪ این پل ها از مقاطع فولادی ساخته شده اند. در این گزارش بیشترین آسیب مربوط به پل های فولادی می باشد. خوردگی، کمبود دوام و خستگی مهمترین مسایل در این پل ها هستند. علاوه بر مشکلات مذکور، بیشتر این پل ها نیاز به تقویت در برابر ترافیک های بیشتر می باشند.

کشور ما نیز از این قضیه مستثنی نیست، در یک محیط دریایی نظیر خلیج فارس، شرایط جغرافیایی و آب و هوای نامناسب، که بسیاری از عوامل خورنده را به دنبال دارد، با درجه حرارت بالا و نیز رطوبت بالا همراه شده که نتیجتاً خوردگی در سازه ها تشدید می‌شود. در مناطق ساحلی خلیج فارس، در تابستان درجهٔ حرارت از ۲۰ تا ۵۰ درجهٔ سانتیگراد تغییر می‌کند، در حالیکه گاه دمای شب و روز، بیش از ۳۰ درجهٔ سانتیگراد متغیر است. و همزمانی دمای بالا با رطوبت بالای ۶۰ درصد و بعضا تا ۱۰۰ درصد در شهرهای ساحلی موجب تخریب تیرورق‌های پل‌های فولادی شده که نیازمند ترمیم و مقاوم سازی می‌باشند.

هزینه های مقاوم سازی در بیشتر مواقع از ساخت پل های جدید کمتر است و علاوه بر آن تعمیر و مقاوم سازی معمولا زمان کمتری می خواهد و نیاز به بازرسی های دوره ای کمتری دارد. با توجه به این اظهارات استفاده از مصالحی جدید در این عرصه امری اجتناب ناپذیر می باشد

۱-۳- روش های مقاوم سازی

عمده ترین تکنیک های مورد استفاده برای مقاوم سازی سازه‌ها به شرح زیر است:

---

[۱] American Association of State High-way and Transportation
[۲] Federal High-way Administration
[۳] National bridge inventory

۱. مقاوم سازی اعضا
۲. اضافه کردن اعضا
۳. توسعه عمل ترکیبی
۴. فراهم کردن پیوستگی در تکیه گاه ها
۵. پیش کشیدگی

تمامی روش های اشاره شده نیاز به زمان اجرای بیشتر، ماشین آلات سنگین، بازرسی های دوره ای زیاد و اکثرا گران قیمت هستند و در بیشتر موارد نمی تواند به کلی مشکل را حل کند.

به عنوان مثال استفاده از صفحات فولادی جوش شده، یکی از روش های مرسوم و سنتی می باشد. اولین استفاده از این تکنیک مربوط به قبل از سال ۱۹۳۴ در فرانسه است که یک پل ۷۳ ساله تعمیر گردید. (Klaiber et al. ۱۹۷۸) مهمترین معایب این روش به شرح زیر است:

۱. نیاز به ماشین آلات سنگین جهت جابجایی صفحات فولادی
۲. به وجود آمدن اثرات خستگی در اعضا
۳. احتمال خوردگی گالوانیک بین صفحه جوش شده و عضو اصلی

چندین مطالعه نیز در راستای استفاده از صفحات فلزی، در حالت چسباندن به وسیله اپوکسی انجام شده است. نخستین گزارش در این زمینه مربوط به پیش از سال ۱۹۶۴ در Durban آفریقای جنوبی می باشد که برای تقویت یک تیر بتنی استفاده شد. (Dussek ۱۹۸۰) این تیر در قسمت کششی با چسباندن صفحه فولادی تقویت گردید و عملکرد تیر تا حد قابل قبولی بهبود یافت.. در سال ۱۹۷۵ در ژاپن، بیشتر از ۲۰۰ دال بتنی پل های شاهراه ها بوسیله چسباندن صفحه های فولادی تقویت گردید. (Raithby ۱۹۸۰)

در یک مطالعه انجام شده در دانشگاه Maryland ، اتصال صفحات فولادی به وسیله اپوکسی به یک تیر فولادی، در عمر خستگی عضو بهبود کافی را نشان داد (Albrecht et al. ۱۹۸۴).که افزایش در عمر خستگی را۲۰ برابر نسبت به حالت جوش گزارش نمودند.

در دهه هشتاد میلادی، سیستم های پلیمر مسلح شده با الیاف Fiber Reinforced Polymers با نام اختصاری FRP در دنیا معرفی شدند؛ که به دلیل داشتن دو جز اصلی، شامل الیاف و ماده چسباننده آنها به یکدیگر به عنوان نوعی ماده مرکب یا کامپوزیت Composite به شمار می روند. در مواد مرکب یا کامپوزیت-ها مشخصات شیمیایی و فیزیکی هر کدام از اجزا متشکله به تنهایی محفوظ است، اما در کنار یکدیگر تشکیل ماده ای جدید با خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی تازه ای را می دهند که کاربردهای ویژه دارند. در کامپوزیت های FRP، مشخصات فیزیکی جدید، مثل سبکی وزن و نازک بودن؛ و مشخصه مکانیکی حائز

اهمیت آنها، مثل مقاومت کششی چندین برابر فولاد و ضریب ارتجاعی مناسب است که کاربردهای آنها را در مقاوم سازی و بازسازی سازه های بتنی، فولادی و بنایی بسیار گسترده و فراگیر کرده است.

اولین تحقیقات انجام شده در زمینه FRP ها از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شده است، زلزله ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن نیز از جمله عوامل موثرتری برای بررسی کاربرد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف FRP جهت تقویت و مقاوم سازی سازه ها در مناطق زلزله خیز گردید.

با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی خاص لمینیت های CFRP ، به عنوان بهترین انتخاب در پروسه مقاوم سازی معرفی شده‌اند. در این رابطه تعداد زیادی کارهای تحقیقاتی نیز درباره ارزیابی موثر بودن انواع صفحات CFRP در بهسازی و مقاوم سازی پل های فولادی(شامل پل های تحت اضافه بار) انجام گرفته است. آنالیزهای قابلیت اعتماد که بر روی یک پل با تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP توسط Okeil انجام شده، نشان می دهد که عملکرد لمینیت‌های CFRP در این نوع مقاومت بسیار مطلوب بوده و تقویت با این لمینیت ها، قابلیت اعتماد سازه را افزایش می دهد.

۱–۴– اهداف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق تعیین کمی بهبود باربری پل‌ها به روش آزمایشگاهی با استفاده از تقویت آنها توسط لمینیت‌های CFRP و توسعه آئین نامه طراحی با استفاده از لمینیت‌های CFRP جهت تقویت تیرورق‌های فولادی پلها می‌باشد. همچنین مشخص کردن مقدار افزایش در سختی و محدوده رفتار الاستیک و ظرفیت نهایی تیرورق‌ها، در این حالت می باشد. این تقویت مربوط به تقویت خمشی تیرورق توسط چسباندن لمینیت CFRP به بال کششی می‌باشد. در این مطالعه آزمایشگاهی تاثیر این نوع تقویت مورد مطالعه قرار خواهند گرفت و درصد کاهش ظرفیت در اثر ناکاملی‌های حین ساخت نیز بررسی خواهد شد.

۱–۵– رویکرد و روش انجام کار

برای رسیدن به اهداف بیان شده، نمونه های متنوعی از تیرورق ها با مقیاس کردن اندازه‌های واقعی ساخته شده و مورد آزمایش و آنالیز قرار می‌گیرند. برای انجام تحلیل ها از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است. ۶ نمونه آزمایشگاهی با در نظر گرفتن دو متغیر طول لمینیت CFRP ونسبت سطح مقطع بال فشاری به بال کششی ساخته شده‌اند. در طراحی نمونه‌ها الزامات آئین نامه LRFD در نظر گرفته شده است تا بتوان عملکرد نمونه‌های واقعی را تخمین زد. در این تحقیق تاثیر طول لمینیت CFRP و نسبت سطح مقطع بال فشاری به بال کششی مورد بررسی آزمایشگاهی و آنالیزی قرار خواهد گرفت.

۱–۶– محدوده مورد مطالعه

محدوده انجام این تحقیق محدود به تقویت خمشی تیرورق ها در بال کششی می باشد. در این مطالعه فرض شده است که تیرورق از یک مقطع I شکل با بال های فشرده و جان لاغر، طبق آیین نامه LRFD ساخته شده است؛ همچنین سخت کننده ها طبق این آیین نامه تعبیه شده اند. تکیه گاه ها نیز در تمامی حالات ساده هستند. اجزا تیرورق توسط جوش آرگون به هم متصل شده‌اند و جوش نیز مقاومت کافی را دارا می باشد.

۱–۷– چارچوب فصول تحقیق

مطالعه اخیر شامل ۷ فصل می باشد:

فصل اول: این فصل شامل مقدمه، ضرورت انجام کار، اهداف تحقیق، روش انجام کار و محدوده مورد مطالعه میباشد.

فصل دوم: آشنایی با ادبیا ت موضوعی مطالعه، بحث تیرورق‌ها و FRP ها و سابقه تحقیق و کارهای انجام شده در این زمینه، بخش های مورد بررسی هستند.

فصل سوم: مضمون این فصل توضیح مفصل درباره نحوه طراحی سیستم تست و آماده سازی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

فصل چهارم: بخش های اشاره شده این فصل، آشنایی با مدل سازی در نرم افزار المان محدود ABAQUS وضوابط آئین نامه LRFD و طراحی نمونه‌ها طبق آئین نامه می‌باشد.

فصل پنجم: این فصل در بر گیرنده شرح و نحوه انجام آزمایشات همراه با مشاهدات می‌باشد

فصل ششم: ارزیابی نتایج آزمایشات و مقایسه نمودارها با نتایج نرم افزاری و کارهای محققین دیگر می‌باشد.

فصل هفتم: خلاصه نتایج حاصل از تحقیق، بررسی و ارائه پیشنهادات، موضوعات این فصل را تشکیل می-دهند.

فصل دوم

ادبیات موضوع و سابقه تحقیق

۲–۱– مقدمه

در این فصل با اصطلاحات و ادبیات بکار رفته در این تحقیق آشنا خواهیم شد. ابتدا تیرورق، انواع و رفتار آن در محدوده الاستیک و پلاستیک تعریف خواهد شد. در بخش دوم به معرفی مصالح کامپوزیت پرداخته می شود و سعی شده است خصوصیات انواع FRP و مزایای آن به طور کامل بررسی شود و در انتهای این بخش دلیل انتخاب CFRP برای مقاوم سازی در این تحقیق آورده خواهد شد. در بخش سوم مروری بر سابقه تحققات و کارهای گذشته در زمینه مقاوم سازی با مصالح CFRP انجام خواهد گرفت، این بخش شامل دو قسمت می‌باشد که قسمت اول مربوط به کارهای عملی و اجرایی در مقاوم سازی بوسیله CFRP است و قسمت دوم اشاره‌ای بر کارهای تحقیقاتی و دانشگاهی خواهد بود.

۲–۲– تیرورق

تیرورق به عضو خمشی اطلاق می شود که اعضای آن به منظور بهبود باربری و عملکرد مطلوب‌تر از ورق ساخته شود. استفاده از تیرورق در دهانه‌ی خمشی بزرگ اقتصادی خواهد بود. تیرورق‌ها را می توان با اتصالات پیچی، پرچی و یا جوشی ایجاد کرد. از آغاز دهه ۱۹۵۰ میلادی که استفاده از صنعت جوشکاری