دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران– سازه

بررسی رفتار تیرهای بتنی بکار رفته در پل‌ها که بوسیله مواد کامپوزیتی تقویت شده‌اند به روش اجزای محدود

رامی عبد الصمد

استاد راهنما:

دکتر ابوالفضل عربزاده

استاد مشاور:

دکتر فرهاد دانشجو

زمستان ۱۳۸۹

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای رامی عبدالصمد پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی رفتار تیرهای بتنی بکار رفته در پلها تقویت شده بوسیله مواد کامپوزیتی به روش اجزای محدود در تاریخ ۱۳۸۹/۱۱/۴ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد سازه پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر ابوالفضل عربزاده	استادیار	
استاد مشاور	دکتر فرهاد دانشجو	استاد	
استاد ناظر	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمدزمان کبیر	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	

تقدیم به

پدر و مادرم بزرگوارم که همواره دعای خیرشان بدرقه راه من بوده است .

برادر و خواهران مهربانم که همواره مهم‌ترین مشوقان زندگی ام بوده‌اند .

تمام دوستانی که همیشه و در همه حال در کنار من بوده‌اند .

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از رهنمودهای ارزنده جناب آقای دکتر ابوالفضل عربزاده که در طول تحصیل و در مراحل طی شده در این پایان‌نامه همواره مشوق و راهنمای اینجانب بوده‌اند، تشکر و سپاسگزاری می‌کنم.

همچنین از بذل توجه و راهنمایی‌هایی استاد ارجمند جناب آقای دکتر فرهاد دانشجو تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از کلیه اساتید محترم گروه سازه که در این مدت تحصیل افتخار شاگردی ایشان را داشته‌ام تشکر و قدردانی می‌کنم.

از دوستان بسیار عزیزم به خصوص مهندس عبداله داودی بواسطه همکاری در انجام ویرایش متن از صمیم قلب متشکرم.

چکیده

در سال‌های اخیر، پلیمرهای مسلح شده با الیاف بیشتر از گذشته در مهندسی عمران و کاربردهای صنعت ساختمان به خصوص جهت تقویت سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. بسیاری از تکنیک‌های تقویتی جدید از ورق FRP به دلیل وزن کم، مقاومت کششی بالا، و مقاومت خوب در برابر خوردگی، استفاده کرده‌اند. طی چند سال گذشته، چند تحقیق آزمایشگاهی در زمینه مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتنی انجام گرفته، و نتایج حاصل از آن نشان می‌دهند که نتیجه‌ی تقویت خمشی تیرهای بتنی با FRP رضایت بخش است. در حالی که روش‌های تجربی برای به دست آوردن آگاهی در مورد رفتار تیرهای بتنی تقویت شده با FRP بسیار مفید هستند، همانطور که در این پایان نامه بررسی شد، استفاده از مدل سازی عددی علی‌رغم هزینه اندک آن، به درک مناسبی از رفتار تیرها بتنی تقویت شده با FRP می‌انجامد. در این پایان نامه از تکنیک‌های روش چسباندن خارجی CFRP و جایگذاری نزدیک سطح برای تقویت تیرهای بتن مسلح به کار رفته در پل‌ها استفاده شده و میزان کارآمدی تکنیک‌های مذکور بر افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی‌ای که تحت بارهای یکنواخت قرار گرفته‌اند، ارزیابی شده است. برنامه اجزاء محدود غیر خطی ANSYS ویرایش ۱۲ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نخست، نمودار بار تغییرشکل به دست آمده از مدل عددی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی سه تیر دارای ویژگی‌های مختلف مقایسه شده، که این مقایسه نشان دهنده دقت مناسب پارامترهای در مدل‌های ساخته شده در ANSYS می‌باشد. سپس تیرهای بتن مسلح پل بزرگراه بین ایالتی (که در سال ۲۰۰۶ توسط Aidoo و همکارانش، تحت عنوان نمونه کنترل و نمونه تقویت شده به روش EB و نمونه تقویت شده به روش NSM مورد آزمایش قرار گرفته‌بود)، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ANSYS مدل سازی شدند. آنگاه با استفاده از مدل‌های که با نتایج آزمایشگاهی کالیبره شده‌اند تاثیر نحوه آرایش، تعداد لایه‌ها، مقدار ورق CFRP در روش EB، و تعداد شیارها و ابعاد شیار در روش NSM و تاثیر مقاوم‌سازی بر سازه‌های پیش بارگذاری شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که با افزایش نسبت CFRP در مقطع، ظرفیت باربری نمونه تا حدودی افزایش یافته، و در یک نسبت یکسان از CFRP، تیرهای تقویت شده به روش NSM به مقاومت نهایی بیشتری از تیرهای تقویت شده به روش EB رسیده‌اند، و همچنین دیده شده که مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده به پیش بارگذاری تیرها وابسته نیست.

کلید واژه: بتن مسلح، پل، تقویت خمشی، FRP، چسباندن خارجی، جایگذاری نزدیک سطح.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ح
فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ذ

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- بیان مسأله و اهداف تحقیق ۳
۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل ۲- مروری بر تحقیقات گذشته ۵

۲-۱- مقدمه ۶
۲-۲- تقویت تیرهای بتنی با استفاده از ورق‌های FRP ۶
۲-۲-۱- مطالعات انجام شده ۶
۲-۲-۲- مدل‌های جدا شدگی صفحات FRP ۱۰
۲-۲-۲-۱- مدل‌هایی که بر پایه ظرفیت برشی عضو ارائه شده‌اند ۱۰
۲-۲-۲-۲- مدل‌های بتن دندانه‌دار ۱۰
۲-۲-۲-۳- مدل‌هایی که براساس تنش‌هایی داخلی ارائه شده‌اند ۱۱
۲-۲-۳- مودهای شکست و رفتار واقعی تیرهای تقویت شده با ورق FRP ۱۲
۲-۳- تقویت تیرهای بتنی با استفاده از روش NSM ۱۳
۲-۳-۱- مطالعات انجام شده ۱۳
۲-۳-۲- مدهای گسیختگی خمشی تیرهای مقاوم‌سازی شده ۱۵
۲-۳-۲-۱- جداشدگی سطح تماس میلگرد و اپوکسی ۱۶
۲-۳-۲-۲- جداشدگی پوشش بتن ۱۶
۲-۳-۲-۳- جدا شدگی سطح تماس اپوکسی بتن ۱۷
۲-۳-۲-۴- مکانیزم گسیختگی جدا شدگی ثانویه ۱۷

فصل ۳- روش‌های تقویت و مقاوم‌سازی خمشی پل‌های بتنی ۱۸

۳-۱- مقدمه ۱۹
۳-۲- ژاکت‌های بتنی درجاریز ۱۹
۳-۳- توزیع مجدد نیروهای داخلی در جهت عرضی ۲۰
۳-۴- سبک کردن عرشه ۲۰

۳-۵- مرمت موضعی ۲۱
۳-۶- چسباندن ورق‌های فولادی روی سطح بتن ۲۱
۳-۷- پس تنیدگی خارجی ۲۲
۳-۸- چسباندن ورق‌های الیاف پلیمری مرکب FRP روی سطح بتن ۲۳
۳-۸-۱- FRP چیست؟ ۲۴
۳-۸-۲- مزایا و معایب سیستم‌های FRP ۲۴
۳-۸-۲-۱- مزایای استفاده از FRP ۲۴
۳-۸-۲-۲- معایب سیستم‌های FRP ۲۵
۳-۸-۳- عناصر تشکیل دهنده ۲۵
۳-۸-۳-۱- الیاف سیستم‌های FRP ۲۵
۳-۸-۳-۲- مقایسه الیاف سیستم‌های FRP ۲۶
۳-۸-۴- انواع محصولات FRP ۲۷
۳-۸-۴-۱- ورق‌های FRP ۲۷
۳-۸-۴-۲- کابل، نوار و تاندن‌های پیش‌تنیدگی ۲۸
۳-۸-۴-۳- میلگردهای FRP ۲۸
۳-۸-۵- مشخصات مکانیکی FRP ۲۹
۳-۸-۵-۱- رفتار کششی سیستم‌های FRP ۲۹
۳-۸-۵-۲- رفتار فشاری سیستم‌های FRP ۲۹
۳-۸-۶- روش جایگذاری نزدیک سطح ۳۰
۳-۸-۶-۱- تعدادی از مزایای روش NSM در مقایسه با روش EB ۳۰
۳-۸-۶-۲- نحوه اجرای تکنیک NSM ۳۱
۳-۸-۶-۳- مصالح مورد استفاده در روش NSM ۳۲
۳-۸-۶-۳-۱- مسلح کننده های FRP ۳۲
۳-۸-۶-۳-۲- پرکننده های شیار ۳۳

فصل ۴- مطالعات تحلیلی ۳۵

۴-۱- مقدمه ۳۶
۴-۲- نحوه‌ی محاسبه تقویت خمشی ۳۶
۴-۲-۱- فرضیات ۳۶
۴-۲-۲- کرنش در مصالح FRP ۳۷
۴-۲-۴- تنش در مصالح FRP ۳۷
۴-۲-۵- مقاومت نهایی تیرهایی مستطیلی ۳۷
۴-۲-۶- مقاومت نهایی تیرهایی مستطیلی دارای فولاد فشاری ۳۹

۴-۲-۷- مقاومت نهایی تیرهایی T شکل ۳۹
۴-۳- تعیین نمودار بار-تغییر شکل تیر مقاوم‌سازی شده ۴۰
۴-۳-۱- مرحله اول منحنی بار-تغییرشکل ۴۲
۴-۳-۲- مرحله دوم منحنی بار-تغییرشکل ۴۳
۴-۳-۳- مرحله سوم منحنی بار-تغییرشکل ۴۴
۴-۳-۴- خلاصه ۴۵
فصل ۵- مدل‌سازی کامپیوتری با نرم افزار اجزاء محدود ANSYS ۴۶
۵-۱- مقدمه ۴۷
۵-۱-۱- معرفی نرم افزار ANSYS ۴۷
۵-۱-۲- مبانی مدل کردن در ANSYS ۴۸
۵-۲- المان‌های منتخب و خصوصیات آنها ۴۸
۵-۲-۱- مدل سازی بتن- استفاده از المان Solid65 ۴۸
۵-۲-۲- میلگردها استفاده از المان LINK8 ۴۹
۵-۲-۳- FRP –استفاده از المان Solid46 ۵۰
۵-۲-۴- المان Solid45 ۵۰
۵-۳- خواص مواد به کار گرفته شده ۵۱
۵-۳-۱- بتن ۵۱
۵-۳-۱-۱- نحوه وارد کردن اطلاعات مربوط به بتن در نرم افزار ANSYS ۵۲
۵-۳-۱-۲- رابطه تنش کرنش فشاری در بتن جهت مدل سازی با ANSYS ۵۳
۵-۳-۱-۳- معیار گسیختگی بتن در المان Solid65 ۵۵
۵-۳-۲- فولاد میلگردها و رق تکیه گاه‌ها ۵۸
۵-۳-۲-۱- فولاد میلگردها ۵۸
۵-۳-۲-۲- فولاد تکیه گاه ۵۸
۵-۳-۳- الیاف کامپوزیتی FRP ۵۸
۵-۳-۴- چسب اپوکسی ۶۱
۵-۴- هندسه المان‌ها و نحوه مدل کردن آن با نرم افزار ANSYS ۶۱
۵-۵- تحلیل غیرخطی ۶۲
فصل ۶- مقایسه نتایج ۶۵
۶-۱- مقدمه ۶۶
۶-۲- مقایسه نمودار بار-تغییرشکل با نتیجه آزمایش [۵۱] ۶۶
۶-۲-۱- نحوه وارد کردن اطلاعات مربوط به بتن در نرم افزار ANSYS ۶۷

۶-۲-۱-۱- بتن ۶۷
۶-۲-۱-۲- فولاد میلگرد و تکیه‌گاه‌ها ۶۸
۶-۲-۱-۳- الیاف کربنی FRP ۶۹
۶-۲-۳- مقایسه نتایج ۶۹
۶-۳- مقایسه نمودار بار-تغییر شکل با نتیجه آزمایش [۲۳] ۷۱
۶-۴- مقایسه نمودار بار-تغییر شکل با نتیجه آزمایش [۴۳] ۷۵

فصل ۷- بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها ۸۰

۷-۱- مقدمه ۸۱
۷-۲- تیرهای مدل شده در نرم افزار ۸۲
۷-۲-۱- مشخصات تیرها ۸۲
۷-۲-۲- نحوه مدل‌سازی تیرها ۸۳
۷-۲-۳- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی ۸۵
۷-۲-۴- مشخصات مصالح ۸۶
۷-۲-۵- تست همگرایی ۸۷
۷-۲-۶- بررسی ومقایسه نتایج ۸۸
۷-۲-۶-۱- تیر کنترل ۸۸
۷-۲-۶-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی تیرهای تقویت شده با ورق FRP ۸۹
۷-۲-۶-۳- شکل‌گیری ترک‌ها در مدل عددی ۹۰
۷-۲-۶-۴- مقایسه تقویت تیرهای بتنی با دو روش EB و NSM ۹۱
۷-۳- مطالعات پارامتریک ۹۳
۷-۳-۱-تأثیر تعداد لایه‌های ورق‌های CFRP در روش چسباندن خارجی ۹۳
۷-۳-۲- تأثیر نحوه آرایش ورق‌های CFRP در روش چسباندن خارجی ۹۴
۷-۳-۳- تأثیر پیش بارگذاری بر رفتار تیرهای تقویت شده ۹۷
۷-۳-۴- تأثیر تعداد شیارها در روش NSM ۹۹
۷-۳-۵- تأثیر ابعاد شیار در روش NSM ۱۰۱

فصل ۸- نتایج و پیشنهادات ۱۰۳

۸-۱- مقدمه ۱۰۴
۸-۲ نمودار بار-تغییر مکان در مدل‌های عددی تحلیلی و آزمایشی ۱۰۴
۸-۳- مطالعات پارامتریک ۱۰۴
۸-۳-۱- مقایسه عملکرد تیرهای بتنی تقویت شده با دو روش EB و NSM ۱۰۴
۸-۳-۲- تأثیر تعداد لایه‌های ورق CFRP در روش چسباندن خارجی ۱۰۵

۸-۳-۳- تأثیر نحوه آرایش ورق‌های CFRP ۱۰۵
۸-۳-۳-۱- مقدار ثابت CFRP در طول تیر ۱۰۵
۸-۳-۳-۲- مقدار متغیر CFRP در طول تیر ۱۰۶
۸-۳-۴- تأثیر پیش بارگذاری بر رفتار تیرهای تقویت شده ۱۰۶
۸-۳-۵- تأثیر تعداد شیارها در روش NSM ۱۰۷
۸-۳-۶- تأثیر ابعاد شیار در روش NSM ۱۰۷
۸-۴- نتیجه‌گیری کلی ۱۰۷
۸-۵- پیشنهادات ۱۰۹
فهرست مراجع ۱۱۰
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۱۴
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۱۵

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ارتفاع بلوک فشاری بتن	a
ضریب انتقال تنش برشی برای ترک‌های بسته	a_t
سطح مقطع مصالح FRP	A_{frp}
سطح مقطع کل آرماتور کششی	A_s
سطح مقطع فولاد کششی معادل با نیروی فشاری بال تیر T شکل	A_{sf}
سطح مقطع باقی مانده فولاد کششی در تیر T شکل	A_{sw}
عرض مقطع	b
ضریب انتقال تنش برشی برای ترک‌های باز	b_t
محل تار خنثی	c
فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح فولاد کششی	d
فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح فولاد فشاری	$d^{'}$
فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز ورق FRP	d_f
مدول الاستیسیته بتن	E_c
مدول الاستیسیته مصالح FRP	E_{frp}
مدول الاستیسیته فولاد	E_s
مدول مرحله سخت شدگی فولاد	$E_{s,sh}$
مقاومت فشاری دو محوره بتن تحت تنش‌های سه محوره (ثابت C6)	f_1
مقاومت فشاری یک محوره بتن تحت تنش‌های سه محوره (ثابت C6)	f_2
مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن	$f_c^{'}$
مقاومت فشاری یک محوره بتن	f_c
مقاومت فشاری دو محوره بتن	f_{cb}
تنش کششی در مصالح FRP	f_{frp}
مقاومت کششی بتن	f_r
تنش کششی در فولاد کششی	f_s
تنش فشاری در فولاد فشاری	$f_s^{'}$
مقاومت جاری شدن فولاد	f_y
تابعی از حالت تنش‌های اصلی	F
ارتفاع کل مقطع	h
ضخامت دال یا بال تیر T شکل	h_f
ممان ناشی از بار اعمال شده	M_a

ممان لحظه‌ی ترک خوردگی	M_{cr}
لنگر خمشی مقاوم اسمی	M_n
لنگر خمشی مقاوم نهایی	M_u
ممان تسلیم تیر	M_y
سطح گسیختگی	S
فاصله تار خنثی از دورترین تار فشاری	x
نسبت عمق مستطیل تنش معادل به عمق تیر خنثی	β_1
ضریب انتقال برش	β_t
کرنش اولیه در سطح کششی بتن	ε_{bi}
کرنش بتن	ε_c
کرنش نهایی بتن	ε_{cu}
کرنش مصالح FRP	ε_{frp}
کرنش مؤثر مصالح FRP	ε_{frpe}
کرنش نهایی مصالح FRP	ε_{frpu}
کرنش نهایی فولاد	ε_y
ضریب جزیی ایمنی	ψ
ضریب جزیی ایمنی بتن	ψ_c
ضریب جزیی ایمنی مصالح FRP	ψ_{frp}
ضریب جزیی ایمنی فولاد	ψ_s
انحنای تیر لحظه‌ی تسلیم آرماتور فولاد	ϕ_y
انحنا لحظه‌ی تسلیم فولاد	$\phi_{y,f}$
تنش فشاری سه محوره برای محاسبه ثابت‌های C7 و C8	σ_a^h
تنش‌های اصلی در جهات اصلی	σ_{xp} ،σ_{yp} ،σ_{zp}

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱) مقایسه‌ی ویژگی‌های ورق FRP تولیدی از الیاف مختلف [۳۹] ۲۶
جدول (۶-۱) مشخصات FRP ۶۹
جدول (۶-۲) نتایج عددی و تحلیلی و تجربی تیر HCB ۷۰
جدول (۶-۳) مشخصات آرماتور فولادی [۲۳] ۷۱
جدول (۶-۴) نتایج عددی و تحلیلی و تجربی تیر ۷۳
جدول (۶-۵) مشخصات میلگردهای فولادی [۴۳] ۷۵
جدول (۶-۶) نتایج عددی و تحلیلی و تجربی تیر CS2 ۷۷
جدول (۶-۷) نتایج عددی و تحلیلی و تجربی تیر Cb1 ۷۸
جدول (۷-۱) مشخصات مصالح ۸۶
جدول (۷-۲) مقایسه نتایج مدل‌های عددی تقویت شده به روش EB و NSM ۹۲
جدول (۷-۳) مقایسه نتایج مدل‌های عددی تیرهای تقویت شده با لایه‌های مختلف ۹۳
جدول (۷-۴) مقایسه نتایج تیرهای تقویت شده با آرایش‌های مختلف و مقدار یکسان از CFRP ۹۵
جدول (۷-۵) مقایسه نتایج مدل عددی تیرهای تقویت شده با لایه‌های مختلف در طول تیر ۹۷
جدول (۷-۶) مقایسه نتایج مدل‌های عددی تیرهای تقویت شده به روش NSM با شیارهای مختلف ۱۰۰
جدول (۷-۷) مقایسه نتایج مدل‌های عددی تیرهای تقویت شده با NSM با شیارهای با ابعاد مختلف ۱۰۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) مدل بتن دندانه دار [۱۷] ۱۱
شکل (۲-۲) مودهای شکست [۱۷] ۱۲
شکل (۳-۱) اجرای ژاکت‌های بتنی مسلح جهت تقویت خمشی [۳۴] ۲۰
شکل (۳-۲) تقویت با توزیع مجدد نیروهای داخلی در عرشه‌های چندتیری [۳۳] ۲۰
شکل (۳-۳) مقاوم‌سازی با سبک کردن عرشه [۳۳] ۲۱
شکل (۳-۴) روش معمول اتصال صفحات فولادی [۱] ۲۲
شکل(۳-۵) مقاوم‌سازی پل با استفاده از کابل‌های پس تنیدگی خارجی [۱] ۲۳
شکل (۳-۶) قسمت‌های تشکیل دهنده یک پلیمر [۳۶] ۲۴
شکل (۳-۷) منحنی تنش کرنش الیاف‌های پلیمری در مقایسه با فولاد [۴۰] ۲۷
شکل (۳-۸) ورق‌های FRP [۴۱] ۲۷
شکل (۳-۹) نوار FRP [۴۱،۲۰] ۲۸
شکل (۳-۱۰) میلگردهای FRP [۴۲] ۲۸
شکل (۱-۱۱) شماتیک روش‌های مختلف تقویت خمشی تیرها با FRP ۳۰
شکل(۳-۱۲) مراحل مقاوم‌سازی با روش NSM [۴۳] ۳۲
شکل (۳-۱۳) انواع آرماتورهای مورد استفاده در روش NSM [۲۰] ۳۳
شکل (۴-۱) نمودار تنش-کرنش مقطع مستطیلی تحت خمش [۳۷] ۳۸
شکل (۴-۲) نحوه تفکیک لنگر مقاوم تیر T شکل ۴۰
شکل (۴-۳) منحنی بار-افت وسط دهانه ۴۱
شکل (۴-۴) نمودار ممان- انحنا ۴۲
شکل (۴-۵) مقطع تبدیل یافته ترک نخورده ۴۲
شکل (۵-۱) مشخصات المان Solid65 [۴۹] ۴۹
شکل (۵-۲) هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات المان Link8 [۴۹] ۴۹
شکل (۵-۳) هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات المان Solid46 [۴۹] ۵۰
شکل (۵-۴) هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات المان Solid45 [۴۹] ۵۱
شکل (۵-۵) منحنی تنش کرنش فشار و کشش تک محوری برای بتن [۵۱،۵۲] ۵۲
شکل (۵-۶) ساده شده منحنی تنش-کرنش در مقاومت فشاری (شیماتیک) [۵۳] ۵۴
شکل (۵-۷) سطح شکست سه بعدی در فضای تنش‌های اصلی [۴۹] ۵۶
شکل (۵-۸) سطح شکست در بتن [۴۹] ۵۷
شکل (۵-۹) منحنی تنش-کرنش فولاد میلگردها [۵۱] ۵۸
شکل (۵-۱۰) شیماتیک از مرکبات FRP [۵۱] ۵۹

شکل (۵-۱۱) منحنی تنش کرنش مرکبات FRP در جهت الیاف [۵۱] ۶۰
شکل (۵-۱۲) نحوه اتصال الف) المان Link8، ب) المان Solid46، با المان بتن [۵۱] ۶۱
شکل (۵-۱۳) بررسی عملکرد روش نیوتون رافسون [۴۹] ۶۳
شکل (۶-۱) ابعاد تیر مبنا [۵۱] ۶۶
شکل (۶-۲) نحوه آرایش و مدل کردن میلگردها [۵۱] ۶۷
شکل (۶-۳) نمودار تنش-کرنش فشاری تک محوری برای بتن در مدل ۶۸
شکل (۶-۴) نحوه تقویت تیر با FRP [۵۱] ۶۹
شکل (۶-۵) مقایسه نمودار بار-تغییر شکل حل تحلیلی و آزمایشگاهی و مدل ANSYS ۷۰
شکل (۶-۶) الگوی شکست در مرحله شکست نمونه ۷۱
شکل (۶-۷) مشخصات هندسی تیر [۲۳] ۷۲
شکل (۶-۸) مدل تیر در ANSYS ۷۲
شکل (۶-۹) مقایسه نمودار بار-تغییر شکل حل تحلیلی و آزمایشگاهی و عددی تیر[۴۳] ۷۳
شکل (۶-۱۰) الگوی شکست در مرحله شکست نمونه ۷۴
شکل (۶-۱۱) مشخصات هندسی تیر (a) ابعاد تیر CB1 CFRP bar (c) (b) CFRP Sheet CS2 [۴۳] ۷۵
شکل (۶-۱۲) مدل تیر CS2 در ANSYS ۷۶
شکل (۶-۱۳) مدل تیر CB1 در ANSYS ۷۶
شکل (۶-۱۴) نمودار بار تغییر شکل تیر CS2 ۷۷
شکل (۶-۱۵) نمودار بار تغییر شکل تیر CB1 ۷۸
شکل (۶-۱۶) الگوی شکست در مرحله شکست نمونه ۷۹
شکل (۷-۱) ابعاد پل و موقعیت تیرهای آن [۲] ۸۲
شکل (۷-۲) موقعیت آرماتورها و ابعاد تیر [۲] ۸۲
شکل (۷-۳) روش‌های تقویت خمشی تیر با روش(الف) EB و (ب) NSM ۸۳
شکل (۷-۴) وضعیت تیر مورد بررسی در آزمایش ۸۳
شکل (۷-۵) نحوه مدل سازی بتن و تکیه‌گاه ۸۴
شکل (۷-۶) نحوه مدل کردن میلگردها با استفاده از المان Link8 ۸۴
شکل (۷-۷) نحوه مدل سازی ورق CFRP در روش (الف) EB و (ب) NSM ۸۵
شکل (۷-۸) نحوه مدل سازی ورق فولادی برای (الف) محل اعمال بار (ب) تکیه‌گاه ۸۵
شکل (۷-۹) بررسی همگرایی ۸۷
شکل (۷-۱۰) نمودار بار تغییر شکل مدل آزمایشگاهی تیر کنترل و نمونه مدل شده در نرم افزار ۸۸
شکل (۷-۱۱) نمودار بار تغییر شکل مدل آزمایشگاهی تیر EX-EB و نمونه مدل شده در نرم افزار ۸۹

شکل (۷-۱۲) نمودار بار تغییر شکل مدل آزمایشگاهی تیر EX-NSM و نمونه مدل شده در نرم افزار ۹۰
شکل (۷-۱۳) گسترش ترک‌های تیر کنترل و تیر تقویت شده ۹۱
شکل (۷-۱۴) نمودار بار-تغییر شکل تیرهای تقویت شده به روش EB و NSM ۹۲
شکل (۷-۱۵) نمودار بار تغییر شکل تیرهای تقویت شده با لایه‌های مختلف ۹۳
شکل (۷-۱۶) آرایش ورق‌های CFRP در روش EB در مدل (الف)EB-ANSYS (ب)EB-NoSYM (پ)EB2Lyr1 (ج) EB2Lyr2 ..... ۹۴
شکل (۷-۱۷) نمودار بار تغییرشکل تیرهای تقویت شده با آرایش‌های مختلف و مقدار یکسان از CFRP ۹۵
شکل (۷-۱۸) نحوه آرایش ورق CFRP در طول تیر EB421Layer ۹۶
شکل (۷-۱۹) نمودار بار تغییرشکل تیرهای تقویت شده با لایه‌های مختلف در طول تیر ۹۶
شکل (۷-۲۰) نمودار بار تغییر شکل تیرهای پیش بارگذاری شده در مقایسه با تیر پیش بارگذاری نشده ۹۸
شکل (۷-۲۱) نمودار بار تغییر شکل تیرهای پل هورستیل کریک پس از تقویت با ورق CFRP در انتهای مرحله پیش بارگذاری ۹۹
شکل (۷-۲۲) تقویت تیر به روش NSM با تعداد شیار مختلف ۱۰۰
شکل (۷-۲۳) نمودار بار تغییر شکل تیرهای تقویت شده به روش NSM با شیارهای مختلف ۱۰۰
شکل (۷-۲۴) (الف) سطح مقطع تیر و ابعاد شیار در تیر (ب) ANSYS-NSM، (پ) NSM-WG و (ج) NSM-NG ۱۰۱
شکل (۷-۲۵) نمودار بار تغییر شکل تیرهای تقویت شده به روش NSM با شیارهای با ابعاد مختلف ۱۰۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پلها نمی توانند برای همیشه باقی بمانند. هر شکل سازه‌ای که به کار رود و هر مصالحی که استفاده شود، دیر یا زود آثار فرسودگی ظاهر می‌شود. هینری پیتروسکی در کتاب خود تحت عنوان Engineers of Dreams نوشته است.

"پل‌ها هم به‌اندازه انسان‌ها تحت تأثیر محیط اطراف خود قرار دارند و ترافیک، آلودگی، استفاده نا درست و کوتاهی در نگهداری آنها أثرات مخربی به دنبال خواهد داشت. بنابراین عواملی به طور مستقیم یا غیرمستقیم قدرت و سلامت پل را محدود خواهند کرد."

عوامل و دلایل متعددی از جمله تعریض باند عبور و عرشه پل، جلوگیری یا پیش‌گیری از خوردگی ناشی از عوامل طبیعی و محیطی، پخش نیروهای ثانویه ناشی از ترافیک (شتاب گیری و ترمز گیری) یا ناشی از زمین لرزه، یا مقاوم‌سازی سازه‌ای پل جهت تحمل حجم ترافیک بیشتر یا وسایل نقلیه سنگین‌تر، باعث تقویت پل هستند. از لحاظ اقتصادی مقاوم‌سازی پل‌ها را در مقایسه با گزینه تعویض و نوسازی عموماً ترجیح داده می‌شود، بدین لحاظ فنون طرح و اجرای عملیات مقاوم‌سازی پلها با شتابی تصاعدی رو به فزونی دارد [۱]. مقاوم‌سازی معمولاً بر عنصری خاص در پل اعمال می شود. مثلاً پی، پایه کناری، درز انبساط، ستون، سرستون تیر و عرشه هر یک ممکن است موضوع مقاوم‌سازی قرار گیرند. در این پایان نامه بر روی مقاوم‌سازی تیرهای پل‌های بتنی بحث خواهیم کرد.

برای مقاوم‌سازی، روش‌های مختلف مانند مرمت موضعی، استفاده از پوشش بتنی، و غیره تحت عنوان "روش‌های کلاسیک" وجود دارد. یکی از روش‌های نوینی که در سال‌های اخیر مورد توجه صنعت‌گران قرار گرفته است، مقاوم‌سازی سازه‌های موجود با استفاده از کامپوزیت‌ها می‌باشد. در این زمینه تحقیقات زیادی صورت پذیرفته و آیین نامه‌هایی مقدماتی برای استفاده از آن‌ها تهیه شده است. در حال حاضر در دنیا کارهای زیادی بر روی این روش‌ها در حال انجام است، و این مطالعات حاکی از مثبت بودن این روش در مسائل مقاوم‌سازی می‌باشد.

۱-۲- بیان مسأله و اهداف تحقیق

مطالعات و بررسی‌های اخیر نشان داده است که تیرهای بتنی که به منظور تحمل خمش تقویت شده‌اند، ممکن است تحت اثر عوامل مختلفی مانند گسیختگی فولاد، پارگی ورق کامپوزیتی، خرد شدن بتن در منطقه فشاری، ترک خوردگی‌های خمشی و برشی در بتن و یا جدایی ورق از زیر تیر بتنی تخریب شوند. لذا دستیابی به یک مدلسازی صحیح از رفتار خرابی یک تیر بتنی تقویت شده با ورق کامپوزیتی مستلزم در نظر گرفتن عوامل متعددی می‌باشد.

هدف از انجام این پایان نامه ایجاد یک مدل سه بعدی مناسب برای تیرهای بتنی تقویت شده بوسیله‌ی دو روش:

۱. چسباندن خارجی ورق FRP[۱].
۲. جایگذاری نزدیک سطح[۲].

و مقایسه نتایج این دو روش با نتایج آزمایشات موجود می باشد.

همچنین در این تحقیق اثر پارامترهای مؤثر بر تقویت تیرهای بتنی به‌کار رفته در پل که توسط Aidoo و همکارانش تحت عنوان نمونه شاهد و نمونه تقویت شده با ورق CFRP و نمونه تقویت شده به روش جایگذاری نزدیک سطح مورد آزمایش قرار گرفتند [۲]، و با استفاده از نرم افزار ANSYS به روش اجزاء محدود مدل سازی شده‌اند، و در ناحیه خطی و غیر خطی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده، سپس با مدل‌سازی ورق‌های CFRP بر روی مدل عددی تیر تأثیر نحوه آرایش، تعداد لایه‌ها و مقدار ورق CFRP در روش چسباندن خارجی، و همچنین تعداد شیارها و عرض شیار در روش جایگذاری نزدیک سطح و تاثیر مقاوم‌سازی بر سازه‌های پیش‌بارگذاری شده، بر میزان افزایش ظرفیت خمشی و مقاومت نهایی تیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

[1] Externally Bonded
[2] Near Surface Mounted