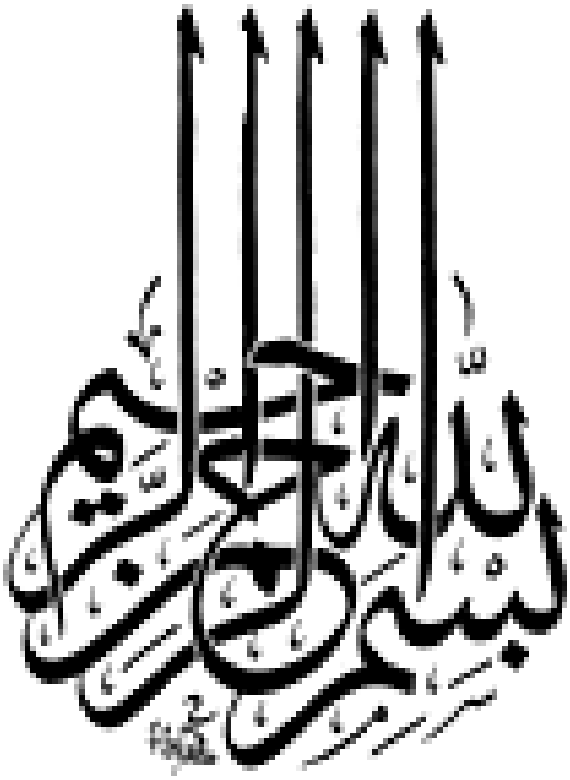

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکدهٔ مهندسی عمران

بررسی امکان افزایش شکل‌پذیری و بازتوزیع لنگر در تیرهای سراسری قاب‌های بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های کامپوزیت CFRP

رسالهٔ دکترای مهندسی عمران- سازه

فرهنگ فرحبد

استاد راهنما

دکتر داود مستوفی نژاد

۱۳۸۶

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده عمران

رسالهٔ دکترای مهندسی عمران - گرایش سازه

فرهنگ فرحبد

تحت عنوان:

بررسی امکان افزایش شکل پذیری و بازتوزیع لنگر در تیرهای سراسری قاب‌های بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های کامپوزیت CFRP

در تاریخ ۱۳۸۶/۸/۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت .

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر داود مستوفی نژاد
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر مجتبی ازهری
۳- استاد داور	دکتر محمد زمان کبیر
۴- استاد داور	دکتر محمد مهدی سعادتپور
۵- استاد داور	دکتر مرتضی مدح خوان
نمایندهٔ مرکز تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دکتر نادر فتحیان پور
نمایندهٔ مرکز تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مرتضی مدح خوان

تشکر و قدردانی

با سپاس از لطف و عنایتی که خداوند متعادل به اینجانب مرحمت فرمود تا نگارش و تدوین این رساله به پایان برسد, لازم است از زحمات، صبر و شکیبایی، و همراهی همسر مهربان و فداکار, و پسر عزیزم خالصانه تشکر و قدردانی نمایم. اگر حمایت همه جانبهٔ آنان نبود، انجام این مهم میسر نمی‌شد. از پشتیبانی برادر مهربان همسرم, جناب آقای سید مهدی صالح که مسبب اصلی شروع دورهٔ تحصیلی دکترای اینجانب بوده و همواره با همدلی و دلسوزی، بنده و همسرم را مورد لطف و عنایت خویش قرار دادند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم. هم‌چنین از زحمات و همراهی خانوادهٔ عزیزم که در طول این دوره یار و غمخوار اینجانب بودند, نهایت تشکر و امتنان را دارم.

از استاد راهنمای محترم, جناب آقای دکتر داود مستوفی نژاد که در تمام مراحل انجام این رساله, با راهنمایی‌های ارزندهٔ خود اینجانب را یاری نمودند, سپاسگزاری می‌نمایم. از استاد مشاور محترم, جناب آقای مجتبی ازهری که افتخار بهره مندی از محضر ایشان در مراحل انجام رساله به اینجانب عنایت گردید, تشکر می‌نمایم.

از جناب آقای دکتر محمد زمان کبیر که به عنوان ممحتن مدعو, قبول زحمت فرمودند و از نقطه نظرات ارزندهٔ ایشان بهره مند گردیدم, خاضعانه تشکر می‌نمایم. از اساتید محترم جناب آقای دکتر محمد مهدی سعادتپور و جناب آقای دکتر مرتضی مدخوان که در کمیتهٔ دفاع به عنوان اساتید داور حضور داشتند, صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم.

هم‌چنین از شرکت محترم دیسمان که زحمت ساخت قاب‌های بتن آرمه را تقبل نمودند، پژوهشکدهٔ فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات که مسئولیت اصلاح, راه اندازی سیستم نرم افزار DACS, سخت افزار و سیستم هیدرولیک دستگاه آزمایش قاب‌ها را به عهده داشتند, و جناب آقای مهندس جمالی که جابجایی جک‌های هیدرولیک و ساخت تکیه‌گاه‌ها توسط ایشان صورت گرفت، کمال تشکر را به عمل می‌آورم.

در خاتمه از دوستان بسیار ارجمندم، آقایان مهندس بهزاد طلائی طباء، شهاب الدین حاتمی، محمد رئیسی, محمد رضا افتخار، نیما عزیزی، سعید ابراهیمی، محمد محمد خانی و تمام دوستان عزیز دانشکدهٔ منهدسی عمران که در طول انجام آزمایش قاب‌ها، اینجانب را همراهی نمودند، خالصانه سپاسگزاری می‌نمایم. هم‌چنین از زحمات جناب آقای مهندس بهنام ابراهیمی و کارکنان محترم آزمایشگاه بتن، و نیز مسئولین محترم سایت کامپیوتر دانشکدهٔ مهندسی عمران، خاضعانه تشکر می‌نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم

به همسرم

و فرزندم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول- اهداف و پیشینهٔ تحقیق

۱-۱- مقدمه (تعریف مساله) ۲

۱-۲- معرفی موضوع تحقیق ۳

۱-۳- اهداف تحقیق حاضر ۳

۱-۴- روش انجام تحقیق ۴

۱-۵- معرفی اجمالی نمونه‌های تجربی ۵

۱-۶-پیشینهٔ تحقیق ۶

۱-۶-۱- مرور اجمالی بر مطالعات تجربی و تحلیلی در رابطه با تقویت خارجی تیرهای یک دهانهٔ ساده ۷

۱-۶-۲- تحقیقات تجربی و تحلیلی صورت گرفته در زمینهٔ تقویت خارجی تیرهای سراسری بتن‌آرمه ۱۳

۱-۷- فصل بندی رساله ۱۸

فصل دوم- کامپوزیت‌های FRP و خواص آنها

۲-۱- مقدمه ۲۰

۲-۲- اجزای مادهٔ کامپوزیت ۲۰

۲-۲-۱- الیاف ۲۰

الف- الیاف کربن ۲۱

ب- الیاف شیشه ۲۲

ج- الیاف آرامید ۲۲

۲-۲-۲- رزین‌ها ۲۲

۲-۳- انواع سیستم‌های تقویت خارجی با ورق‌های FRP ۲۳

۲-۳-۱- سیستم لایه‌ای مرطوب ۲۳

۲-۳-۲- سیستم‌های FRP از پیش اشباع شدهٔ پس عمل آوری شده ۲۴

۲-۳-۳- سیستم‌های FRP پیش عمل آوری شده ۲۴
۲-۴- خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FRP ۲۴

فصل سوم- کاربرد ورق‌های FRP در تقویت خمشی خارجی و مروری بر ملاحظات طراحی

۳-۱- مقدمه ۲۷
۳-۲- ملاحظات کلی ۲۸
۳-۲-۱- فرضیات اساسی ۲۸
۳-۲-۲- کنترل مقاومت برشی مقطع ۲۸
۳-۲-۳- کرنش اولیه در سطح بتن به هنگام نصب ورق تقویت ۲۹
۳-۳- مودهای شکست در تقویت خمشی ۳۰
۳-۳-۱- شکست فشاری ۳۱
۳-۳-۲- شکست ناشی از گسیختگی ورق FRP ۳۲
۳-۳-۳- شکست کششی ۳۳
الف- سطح مقطع حداکثر ورق FRP ۳۴
ب- سطح مقطع حداقل ورق FRP ۳۵
۳-۳-۴- شکست ناشی از جدا شدگی ورق در تقویت خمشی با کامپوزیت FRP ۳۷
الف- مقاومت جدا شدگی مبناء حاصل از ترک میانی IC در حالت کلی ۳۸
ب- جدا شدگی ورق تقویت طولی حاصل از ترک میانی IC در تیرها ۴۴
ج- جدا شدگی ورق تقویت حاصل از نیروی برشی قائم (مکانیزم جدا شدگی VAy) ۴۷
د- جدا شدگی انتهایی ورق تقویت (PE) ۴۸
۳-۴- تحلیل تنش‌های بهره‌برداری ۴۸
۳-۴-۱- تنش‌های مجاز در فولاد، بتن و FRP ۴۹
۳-۴-۲- تنش‌های مجاز در تیرهای بتن‌آرمهٔ تقویت شده ۴۹
۳-۴-۳- تغییرمکان و عرض ترک‌ها در تیرهای تقویت شده ۵۰
۳-۵- جزئیات تقویت خارجی با FRP ۵۱
۳-۵-۱- کلیات ۵۱
۳-۵-۲- چسبندگی و جدا شدگی FRP ۵۲

۳-۵-۳- طول مهاری ۵۳
۳-۵-۴- وصله‌ها ۵۳
۳-۵-۵- نقاط قطع FRP ۵۴
۳-۶- خلاصهٔ مطالب فصل ۵۵

فصل چهارم- شکل‌پذیری و بازتوزیع لنگر در اعضاء خمشی سراسری بتن‌آرمهٔ بدون و با صفحات تقویتی FRP

۴-۱- مقدمه ۵۶
۴-۲- اهمیت و مفهوم شکل پذیری ۵۶
۴-۳- خواص شکل پذیری بتن، آرماتور فولادی و FRP ۵۸
۴-۳-۱- شکل پذیری بتن ۵۸
۴-۳-۲- شکل پذیری فولاد ۵۸
۴-۳-۳- شکل پذیری FRP ۵۹
۴-۴- شکل پذیری تیرهای بتن آرمهٔ تقویت نشده ۵۹
۴-۴-۱- نحوهٔ محاسبهٔ شکل پذیری انحنایی یک تیر تقویت نشده ۵۹
۴-۵- شکل پذیری تیرهای بتن آرمهٔ تقویت شده با FRP ۶۲
۴-۵-۱- نحوهٔ محاسبهٔ شکل پذیری انحنایی یک تیر تقویت شده با FRP ۶۴
الف- محاسبهٔ عمق تار خنثی در حالت نهائی ۶۵
ب- محاسبهٔ عمق تار خنثی در آغاز تسلیم ۶۵
۴-۶- بازتوزیع لنگر در اعضای خمشی بتن آرمهٔ با و بدون صفحات تقویتی ۶۸
۴-۶-۱- مفهوم بازتوزیع لنگر ۶۸
۴-۶-۲- بازتوزیع لنگر در اعضای خمشی با و بدون ورق تقویت بر اساس آئین نامه‌های مختلف ۷۰
۴-۶-۳- روش‌های تخمین بازتوزیع لنگر در اعضای خمشی بتن آرمه ۷۲
الف- روش مفصل پلاستیک ۷۲
ب- روش صلبیت خمشی ۷۴
۴-۶-۴- کاربرد روش مفصل پلاستیک جهت تخمین میزان بازتوزیع لنگر در اعضای خمشی سراسری تقویت نشده ... ۷۶
الف- تقاضای شکل پذیری ۷۷
ب- ظرفیت شکل پذیری ۷۸

ج- درصد بازتوزیع مجاز لنگر ۸۰
د- طول ناحیهٔ پلاستیک..... ۸۱
۴-۷- خلاصهٔ مطالب فصل..... ۸۲

فصل پنجم- تعریف نمونه‌های تجربی و تحلیلی قاب‌های بتن‌آرمه و تنظیمات آزمایش

۵-۱- مقدمه ۸۴
۵-۲- مشخصات نمونه‌های پیشنهادی..... ۸۵
۵-۲-۱- مشخصات نمونه‌های تجربی..... ۸۶
الف- جزئیات نمونه‌های تجربی ۸۸
ب- چگونگی آماده سازی سطح بتن جهت تقویت نمونه‌های تجربی..... ۹۳
ج- نحوهٔ استفاده از تسمه و پیچ فولادی جهت مهار مکانیکی نمونه‌های تقویت شده ۹۴
۵-۲-۲- مشخصات نمونه‌های تحلیلی ۹۶
۵-۳- دستگاه و تجهیزات مورد استفاده جهت آزمایش ۹۸

فصل ششم- آزمایش‌های جانبی

۶-۱- مقدمه ۱۰۱
۶-۲- مشخصات مکانیکی میلگردهای فولادی مورد استفاده در قاب‌های بتن‌آرمه..... ۱۰۲
۶-۲-۱- استفاده از کرنش سنج الکتریکی FLA در تعیین منحنی تنش-کرنش میلگرد فولادی..... ۱۰۳
۶-۳- مشخصات بتن مصرفی در ساخت قاب‌ها..... ۱۰۵
۶-۳-۱- استفاده از کرنش سنج الکتریکی و کرنش سنج مکانیکی در تعیین منحنی تنش-کرنش بتن..... ۱۰۷
۶-۴- مشخصات کامپوزیت CFRP مورد استفاده در تقویت قاب‌های نمونه ۱۰۸
۶-۴-۱- خواص مکانیکی مادهٔ کامپوزیت به کار رفته در تقویت قاب‌ها..... ۱۰۹
۶-۴-۲- استفاده از کرنش سنج الکتریکی جهت بررسی منحنی تنش-کرنش کامپوزیت CFRP..... ۱۱۱

فصل هفتم- نتایج حاصل از آزمایش قاب‌های بتن‌آرمهٔ بدون و با صفحات تقویتی FRP

۷-۱- مقدمه ۱۱۳
۷-۲- نحوهٔ توزیع ترک‌ها..... ۱۱۴

۷-۳- مکانیزم شکست ۱۲۴
۷-۴- بار شکست و میزان افزایش در ظرفیت باربری ۱۲۸
۷-۵- نیروهای عکس العمل تکیه‌گاه کناری ۱۳۰
۷-۶- منحنی تغییرات بار- لنگر خمشی ۱۳۱
۷-۷- کرنش فولاد کششی در مقاطع بحرانی ۱۳۳
۷-۸- کرنش بتن ناحیهٔ فشاری در مقاطع بحرانی ۱۳۶
۷-۹- کرنش در ورق تقویت CFRP ۱۳۸
۷-۱۰- منحنی‌های لنگر- انحناء در مقاطع بحرانی ۱۴۲
۷-۱۱- شکل پذیری قاب‌ها ۱۴۶
۷-۱۲- ارزیابی بازتوزیع لنگر ۱۴۸
۷-۱۳- خلاصه و جمع بندی نتایج این فصل ۱۵۵

فصل هشتم- ارزیابی تحلیلی نمونه‌های تجربی در نرم افزار ANSYS و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایشگاهی

۸-۱- مقدمه ۱۶۰
۸-۲- روند مدل سازی اعضای بتن آرمه در نرم افزار ANSYS ۱۶۰
۸-۲-۱- معیار شکست حاکم بر رفتار بتن در نرم افزار ANSYS ۱۶۱
۸-۲-۲- پارامترهای مورد نیاز در مدل سازی اجزاء محدود اعضاء بتن‌آرمه ۱۶۲
۸-۲-۳- المان‌های مورد استفاده برای مدل سازی بتن و آرماتور در ANSYS ۱۶۵
۸-۲-۴- روش مدل سازی اعضاء بتن‌آرمه در ANSYS ۱۶۶
۸-۳- مدل سازی کامپوزیت‌های FRP در ANSYS ۱۶۷
۸-۳-۱- المان‌های مورد استفاده برای مدل سازی FRP در ANSYS ۱۶۸
۸-٤- تحلیل غیرخطی قاب‌های تقویت نشدهٔ تجربی در ANSYS ۱۶۹
۸-۴-۱- معرفی مادهٔ بتن و فولاد به کار رفته در مدل ۱۶۹
۸-۴-۲- مدل سازی، بارگذاری و تحلیل قاب‌های کنترلی ۱۷۰
۸-۵- مقایسهٔ نتایج تحلیل غیر خطی و آزمایشگاهی در قاب‌های کنترلی تقویت نشده ۱۷۲
۸-۵-۱- مقایسهٔ نتایج تجربی و تحلیلی منحنی بار- تغییر مکان و ترک خوردگی ۱۷۲
۸-۵-۲- مقایسهٔ نتایج تجربی و تحلیلی منحنی‌های بار- عکس العمل انتهایی ۱۷۵

۸-۵-۳- مقایسهٔ نتایج تجربی و تحلیلی منحنی‌های لنگر- انحناء ۱۷۵
۸-۵-۴- بررسی تحلیلی و تجربی شکل پذیری قاب‌های تقویت نشده ۱۷۶
۸-۵-۵- ارزیابی تحلیلی و تجربی بازتوزیع لنگر در قاب‌های تقویت نشده ۱۷۷
۸-٦- تحلیل غیر خطی قاب‌های تقویت شدهٔ تجربی در ANSYS..... ۱۷۹
۸-٦-۱- معرفی مشخصات کلی ورق CFRP و چسب در مدل ۱۷۹
۸-٦-۲- مدل سازی و تحلیل قاب‌های تقویت شده..... ۱۸۰
۸-۷- مقایسهٔ نتایج تحلیل غیر خطی و آزمایشگاهی در قاب‌های تقویت شده ۱۸۳
۸-۷-۱- مقایسهٔ نتایج تحلیلی و تجربی منحنی بار - تغییر مکان قاب‌های تقویت شده ۱۸۳
۸-۷-۲- مقایسهٔ ترک خوردگی حاصل از نتایج تحلیلی و تجربی در قاب‌های تقویت شده ۱۸۶
۸-۷-۳- مقایسهٔ نتایج تحلیلی و تجربی منحنی بار - عکس‌العمل انتهایی قاب‌های تقویت شده..... ۱۸۸
۸-۷-۴- مقایسهٔ نتایج تحلیلی و تجربی منحنی‌های لنگر - انحناء قاب‌های تقویت شده ۱۹۰
۸-۷-۵- بررسی تحلیلی و تجربی شکل پذیری در قاب‌های تقویت شده ۱۹۳
۸-۷-۶- مقایسهٔ تحلیلی و تجربی مقادیر کرنش در ورق تقویت فوقانی و تحتانی..... ۱۹۶
۸-۷-۷- ارزیابی تحلیلی و تجربی بازتوزیع لنگر در قاب‌های تقویت شده ۲۰۰
۸-۸- تعیین معیارهای اساسی برای نمونه‌های تحلیلی بعدی ۲۰۴
۸-۹- خلاصه و نتایج این فصل ۲۰۵

فصل نهم- مدل سازی و بررسی تحلیلی قاب‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای جدید

۹-۱- مقدمه ۲۰۹
۹-۲- مشخصات قاب‌های تحلیلی با و بدون ورق تقویت با در نظر گرفتن عوامل جدید..... ۲۱۰
۹-۲-۱- معرفی مشخصات مواد بتن، فولاد و ورق CFRP به کار رفته در مدل سازی..... ۲۱۱
۹-۲-۲- مدل سازی و تحلیلی غیر خطی قاب‌های با وبدون ورق تقویت..... ۲۱۲
۹-۳- نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی قاب‌های کنترلی گروه A و B با در نظر گرفتن عوامل تنش تسلیم فولاد طولی و مقاومت فشاری بتن..... ۲۱۲
۹-۳-۱- بررسی تاثیر میزان مقاومت فولاد و بتن بر ظرفیت باربری قاب‌های کنترلی..... ۲۱۳
۹-۳-۲- بررسی تاثیر میزان مقاومت فولاد و بتن بر ظرفیت خمشی و انحنای مقاطع بحرانی قاب‌های کنترلی ۲۱۴
۹-۳-۳- بررسی تاثیر میزان مقاومت فولاد و بتن بر شکل پذیری مقاطع بحرانی قاب‌های کنترلی..... ۲۱۶

۹-۳-۴- بررسی تاثیر میزان مقاومت فولاد و بتن بر بازتوزیع لنگر در مقاطع بحرانی قاب‌های کنترلی ۲۱۷
۹-٤- نتایج حاصل از تحلیل قاب‌های تقویت شده، با در نظر گرفتن عوامل مقاومت کششی ورق CFRP، تنش تسلیم فولاد طولی و مقاومت فشاری بتن ۲۱۸
۹-۴-۱- بررسی تاثیر میزان مقاومت ورق تقویت، فولاد و بتن بر ظرفیت باربری قاب‌های تقویت شدهٔ گروه A و B..... ۲۱۹
۹-۴-۲- بررسی تاثیر میزان مقاومت ورق تقویت، فولاد و بتن بر ظرفیت خمشی و انحنای قاب‌های تقویت شدهٔ گروه A و B..... ۲۲۷
۹-۴-۳- بررسی تاثیر میزان مقاومت ورق تقویت، فولاد و بتن بر شکل پذیری قاب‌های تقویت شدهٔ گروه A و B..... ۲۳۴
۹-۴-۴- بررسی تاثیر میزان مقاومت ورق تقویت، فولاد و بتن بر بازتوزیع لنگر قاب‌های تقویت شدهٔ گروه A و B..... ۲۳۸
۹-۵- خلاصه و ارائهٔ نتایج این فصل..... ۲۵۰
۹-۶- نتایج مهم و کلی فصل ۲۵۲

فصل دهم- استفاده از روش صلبیت خمشی جهت تخمین میزان بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری تقویت شده با ورق‌های FRP

۱۰-۱- مقدمه ۲۵۵
۱۰-۲- تخمین بازتوزیع لنگر در قاب‌های خمشی تقویت شدهٔ تحت اثر بار متمرکز (انتهای گیردار- غلتکی)..... ۲۵۶
۱۰-۲-۱- ارزیابی و مقایسهٔ نتایج حاصل از روش حاضر با نتایج آزمایشگاهی موجود ۲۶۱
۱۰-۲-۲- ارزیابی و مقایسهٔ نتایج حاصل از روش حاضر با نتایج تجربی مندرج در مرجع [۳۸]..... ۲۶۹
۱۰-۳- تخمین بازتوزیع لنگر در قاب تقویت شدهٔ تحت اثر بار گسترده (انتهای گیردار- گیردار) ۲۷۲
۱۰-۳-۱- مطالعهٔ موردی بازتوزیع لنگر در تیر تقویت شدهٔ دو سر گیردار تحت اثر بارگستردهٔ یکنواخت ۲۷۵
۱۰-۴- جمع بندی نتایج این فصل..... ۲۷۸

فصل یازدهم- نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۱-۱- مقدمه ۲۸۰
۱۱-۲- خلاصهٔ مطالعات انجام شده..... ۲۸۰
۱۱-۳- وجوه تمایز تحقیق حاضر با مطالعات سایر محققین ۲۸۲
۱۱-۴- نتایج به‌دست آمده..... ۲۸۳
۱۱-۴-۱- نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های تجربی ۲۸۳

۱۱-۴-۲- نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی نمونه‌های تحلیلی ۲۸۵
۱۱-۴-۳- نتایج حاصل از روش صلبیت خمشی جهت تخمین میزان بازتوزیع لنگر ۲۸۵
۱۱-۵- توصیه‌های عملی بر مبنای نتایج این تحقیق ۲۸۶
۱۱-۶- پیشنهادها برای ادامهٔ تحقیقات ۲۸۷

پیوست ۱: تخمین اولیهٔ ظرفیت باربری نهائی و بررسی امکان بازتوزیع لنگر در نمونه‌های تجربی ۲۸۹
پیوست۲: تصاویری از ساخت، نصب کرنش سنج‌ها و آزمایش قاب‌های با و بدون ورق تقویت ۳۰۳
پیوست۳: کانتور تنش و کرنش در فولاد طولی، بتن، ورق CFRP و چسب برای تعدادی از قاب‌های تقویت شده ۳۱۳

مراجع ۳۱۹

چکیده

تقویت تیرهای سراسری در قاب‌های بتن مسلح یکی از مطالب مهم جهت مرمت این‌گونه سازه‌ها به شمار می‌رود. بازتوزیع لنگر از جمله ویژگی‌های مهم اعضای خمشی سراسری است؛ زیرا با رسیدن لنگر به حد نهائی در یک نقطه از تیر، مفصل پلاستیک درآن نقطه تشکیل می‌شود. وجود شکل پذیری کافی، شرایط لازم را برای بازتوزیع لنگر و تنش در سایر نقاط تیرهای قاب فراهم آورده و سبب می‌شود که در آن نقاط نیز تنش‌ها به حد نهائی برسند.

رسالهٔ حاضر به بررسی امکان افزایش شکل پذیری و بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری بتن آرمهٔ تقویت شده با ورق‌های CFRP می‌پردازد. برای این منظور، ۱۱ نمونه قاب سراسری، مشتمل بر ۲ قاب کنترلی و ۹ قاب تقویت شده، با در نظر گرفتن متغیرهای میزان فولاد طولی تیر، و میزان و چگونگی آرایش ورق تقویت مورد آزمایش قرار گرفتند. قاب‌ها با توجه به فولاد گذاری طولی تیرهای آن، به دو دستهٔ A و B تقسیم شدند. تیر قاب‌های دستهٔ A شامل $0.4\rho_b$ فولاد کششی و $0.4\rho_b$ فولاد فشاری در ناحیهٔ وسط دهانه و مجاور ستون؛ و تیر قاب‌های دستهٔ B شامل $0.4\rho_b$ فولاد کششی و $0.2\rho_b$ فولاد فشاری در ناحیهٔ وسط دهانه، و $0.2\rho_b$ فولاد کششی و $0.4\rho_b$ فولاد فشاری در ناحیهٔ مجاور ستون بودند. با توجه به محدودیتی که وجود ستون میانی در نصب پیوستهٔ ورق تقویت ناحیهٔ لنگر منفی قاب‌ها ایجاد می‌نمود، پخ کوچکی در گوشهٔ فوقانی اتصال تیر- ستون به وجود آورده و تقویت این ناحیه به صورت L شکل انجام شد. برای جلوگیری از جدا شدگی انتهایی و جدا شدن ورق تقویت در محل پخ اتصال تیر- ستون، در تمام قاب‌های تقویت شده، از مهار U شکل CFRP، و در قاب‌های آخر هر دسته، علاوه بر مهار U شکل، از مهار مکانیکی تسمه و پیچ فولادی در طول ورق تحتانی، و در محل پخ گرهٔ اتصال استفاده گردید.

بررسی بر روی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ظرفیت باربری در قاب‌های دستهٔ A و B، بسته به میزان و نحوهٔ آرایش ورق تقویت، و استفاده یا عدم استفاده از مهار مکانیکی تسمه و پیچ فولادی، به ترتیب ۱۶٪ الی ۳۳٪ و ۲۲٪ الی ۳۸٪ نسبت به قاب کنترلی نظیرشان رشد داشته است. ظرفیت خمشی وجه ستون و وسط دهانهٔ قاب‌های تقویت شده نیز به ترتیب تا میزان حداکثر ۲۰٪ و ۵۸٪ نسبت به قاب تقویت نشدهٔ نظیر خود رشد نموده؛ و لذا تقویت خمشی در ناحیهٔ وسط دهانهٔ قاب‌های تقویت شده به مراتب موثرتر از ناحیهٔ مجاور ستون بوده است. شکل پذیری در قاب‌های تقویت شدهٔ بدون مهار مکانیکی تسمه و پیچ فولادی، با توجه به محاسبهٔ ضریب شکل پذیری انحنایی، ۱/۵ تا ۲/۲ برابر نسبت به قاب کنترلی کاهش یافت؛ و در قاب تقویت شدهٔ همراه با مهار مکانیکی تسمه و پیچ فولادی نیز کاهش بیش‌تری تا ۱/۵ برابر نسبت به قاب تقویت شدهٔ بدون مهار پیدا نمود. نکتهٔ دیگر آن که در تمام قاب‌های تقویت شده، به میزان ۲۰٪ تا ۵۶٪ بازتوزیع لنگر مشاهده شد. میزان بازتوزیع لنگر در قاب‌های تقویت شده‌ای که فقط در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه تقویت شده بودند، بیش از قاب‌های تقویت شده در هر دو ناحیهٔ وسط دهانه و مجاور ستون؛ و در قاب‌های تقویت شده با تعداد چهار لایه، بیش از قاب تقویت شده با دو لایه به‌دست آمد.

در مرحلهٔ بعد علاوه بر ۱۱ نمونهٔ تجربی، با در نظر گرفتن متغیرهای نوع ورق CFRP، نوع تنش تسلیم فولاد و مقاومت فشاری بتن، ۷۷ نمونهٔ دیگر در نرم افزار ANSYS مدل سازی و تحلیل غیر خطی شدند. نتایج حاصل از تحلیل‌های مزبور نشان داد که استفاده از ورق CFRP نوع قوی‌تر، سبب افزایش ۱/۱۵ تا ۱/۷۰ برابر در ضریب شکل پذیری انحنایی، و ۱/۰۵ تا ۱/۳۰ برابر در میزان بازتوزیع لنگر قاب‌های تقویت شده می‌شود. حال آن که استفاده از فولاد با تنش تسلیم بزرگ‌تر، به کاهش ۱/۱۰ تا ۱/۸۰ برابر در ضریب شکل پذیری و ۱/۰۳ تا ۱/۲۵ برابر در بازتوزیع لنگر منتهی خواهد شد. به کار بردن بتن با مقاومت فشاری بزرگ‌تر نیز، سبب کاهش ضریب شکل پذیری انحنایی و بازتوزیع لنگر، به میزان حدود ۱/۰۲ تا ۱/۳۰ برابر گردید.

در این تحقیق، هم‌چنین روابطی با استفاده از روش صلبیت خمشی و انتخاب صلبیت‌های خمشی مناسب ترک نخورده و ترک خورده در نواحی وسط دهانه و مجاور تکیه‌گاه، برای تخمین بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری تقویت شده توسعه داده شد. مقادیر بازتوزیع لنگر حاصل از روابط مزبور، انطباق مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی حاضر و نتایج تحلیلی موجود نشان داد.

فصل اول
اهداف و پیشینهٔ تحقیق

۱-۱- مقدمه (تعریف مساله)

لزوم حفظ و نگهداری سازه‌های باستانی و نیز عدم توان باربری برخی از سازه‌های موجود (به دلایلی نظیر تدوین آئین‌نامه‌های جدید زلزله، افزایش بارهای اعمالی ناشی از تغییر کاربری و ...)، سبب شده است که مرمت و مقاوم سازی سازه‌های موجود به‌عنوان یکی از موضوعات مهم و اساسی در سراسر دنیا مطرح گردد. یکی از مصالحی که در سال‌های اخیر جهت بهسازی و تقویت سازه‌های مختلف مورد استفادهٔ فراوان قرار گرفته است، کامپوزیت‌هایFRP (پلاستیک‌های مسلح به الیاف) می‌باشند. مزایای گوناگون این نوع کامپوزیت نظیر مقاومت بالا، وزن کم، سهولت نصب، مقاومت در مقابل خوردگی، و تغییرات جزئی در هندسه و شکل سازه‌های تقویت شده، باعث گردیده که این نوع الیاف در تقویت و بهسازی انواع سازه‌ها به‌خصوص سازه‌های بتن‌آرمه به کار گرفته شوند.

تیرهای سراسری در قاب‌های بتن مسلح و یا عرشهٔ پل‌ها نیز مانند دیگر اجزای سازه‌ای باربر با توجه به موارد فوق مستلزم بهسازی و تقویت می‌باشند. تا کنون مطالعات زیادی بر روی تقویت تیرهای متکی بر تکیه‌گاه ساده به‌عمل آمده، ولی در مورد تقویت تیرهای سراسری تحقیقات محدودی صورت گرفته است. تیرهای سراسری مزایای متعددی مانند امکان پوشش دهانه‌های بزرگ با ابعاد کوچک‌تر و نیز امکان تحمل تغییر شکل‌های بزرگ قبل از وقوع خرابی در سازه را دارند. بروز مقطع بحرانی ناشی از حداکثر بودن برش و خمش در تکیه‌گاه میانی سبب گردیده است که مقاوم سازی این‌گونه تیرها مورد توجه بسیاری از محققین

قرار گیرد. به‌علاوه وجود ستون‌های میانی همواره باعث ایجاد محدودیت‌هائی از نظر نصب ورق‌های FRP و عدم پیوستگی تقویت خمشی می‌گردد.

از سویی دیگر یکی از مسائل مهم در طراحی تیرهای بتن آرمه داشتن شکل پذیری کافی به منظور جلوگیری از بروز شکست ترد و نابهنگام و امکان بازتوزیع لنگر بین نواحی لنگر منفی و مثبت آن‌ها می‌باشد. امکان باز توزیع لنگر یکی از ویژگی‌های مهم تیرهای سراسری است؛ چرا که با رسیدن لنگر به حد نهائی در یک نقطه از تیر، مفصل پلاستیک در آن نقطه تشکیل می‌گردد. وجود شکل پذیری کافی، شرایط لازم را برای بازتوزیع تنش و لنگر در سایر نقاط تیر فراهم آورده و موجب می‌شود که در نقاط دیگر همگون با نقطهٔ مفصل پلاستیک اولیه، تنش‌ها به حد نهائی برسند. تامین شکل پذیری کافی در تیرهای سراسری تقویت شده با ورق‌های FRP نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بررسی بازتوزیع لنگر در این‌گونه تیرهای تقویت شده، به مراتب مهم‌تر و دشوارتر بوده، و مستلزم انجام تحقیقات تجربی و تحلیلی خاص خود می‌باشد.

۱-۲- معرفی موضوع تحقیق

مرور بر پیشینهٔ تحقیق که در قسمت ۱-۶ ارائه خواهد شد، نشان دهندهٔ این مطلب است که تحقیقاتی هر چند محدود در خصوص تقویت تیرهای سراسری با کامپوزیت‌های FRP و تعیین میزان بازتوزیع لنگر در آن‌ها صورت گرفته است؛ ولی در رابطه با امکان پذیر بودن وقوع بازتوزیع لنگر در قاب‌های خمشی سراسری تقویت شده با ورق‌های FRP، با توجه به گزارشات متعدد که حاکی از کاهش شکل پذیری در مقاطع تقویت شده می‌باشد، تا کنون هیچ تحقیق جامعی انجام نشده است. به همین علت، تحقیق حاضر به بررسی امکان افزایش شکل پذیری و هم‌چنین وقوع یا عدم وقوع بازتوزیع لنگر در قاب‌های خمشی سراسری تقویت شده با کامپوزیت CFRP می‌پردازد. برای این منظور تعدادی قاب خمشی با در نظر گرفتن متغیرهای اساسی، در دو ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی، و تعداد دیگری نیز فقط در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانهٔ تیرهای قاب، با تعداد لایه‌های متغیر از ورق CFRP تقویت خواهند شد. با بارگذاری نمودن قاب‌های با و بدون ورق تقویت تا مرحلهٔ شکست، و تعیین میزان ظرفیت خمشی، میزان شکل پذیری و مقادیر بازتوزیع لنگر در نواحی تکیه‌گاه و وسط دهانهٔ قاب‌های مزبور، چگونگی تغییرات روند بازتوزیع لنگر در طول بارگذاری ارزیابی و شناسایی می‌گردد.

۱-۳- اهداف تحقیق حاضر

اهدافی که در این تحقیق دنبال می‌شود را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- بررسی چگونگی افزایش ظرفیت باربری و خمشی در قاب‌های بتن‌آرمهٔ سراسری تقویت شده با ورق‌های CFRP، بر خلاف محدودیتی که با توجه به وجود تکیه‌گاه میانی (ستون) و یا تیرهای متعامد در

محل اتصال قاب‌های خمشی، از نظر نصب پیوسته و سراسری ورق تقویت در ناحیهٔ لنگر منفی اینگونه قاب‌ها وجود دارد، و اتخاذ شیوهٔ مناسب جهت چسباندن ورق در این ناحیه (مانند استفاده از پخ در گوشهٔ اتصال)،

۲- مطالعهٔ مودهای مختلف خرابی خمشی، مانند خرابی فشاری، گسیختگی ورق CFRP، خرابی کششی، و خرابی حاصل از جدا شدن ورق CFRP؛ و ارائهٔ رابطه‌ای مناسب برای ارزیابی شکل پذیری انحنایی قاب‌های تقویت شده،

۳- بررسی امکان دست یابی به شکل پذیری بیش‌تر در قاب‌های خمشی سراسری تقویت شده،

۴- بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی امکان فراهم شدن شکل پذیری کافی و وقوع بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری تقویت شده، با در نظر گرفتن متغیرهای میزان فولاد کششی، میزان ورق تقویت CFRP، چگونگی آرایش ورق از نظر تقویت هم زمان یا غیر هم زمان ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه،

۵- بررسی تاثیر جلوگیری کامل از جدا شدن ورق‌های تقویتی، با تقویت در دو ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و فوقانی تکیه‌گاه و استفاده از پیچ و تسمهٔ فولادی، بر شکل پذیری و بازتوزیع لنگر در قاب‌های تقویت شده،

۶- مطالعهٔ پارامتری و ارزیابی تحلیلی، با لحاظ نمودن سایر متغیرهای موثر نظیر تنش تسلیم فولاد، مقاومت فشاری بتن، و مقاومت گسیختگی ورق CFRP، بر شکل پذیری و بازتوزیع لنگر در این‌گونه قاب‌ها،

۷- دست یابی به رابطه‌ای مناسب جهت تخمین میزان بازتوزیع لنگر در قاب‌های خمشی سراسری تقویت شده.

۱-۴- روش انجام تحقیق

به منظور رسیدن به اهداف ذکر شده در قسمت ۱-۳، انجام تحقیق مزبور را می‌توان در مراحل زیر خلاصه نمود:

۱- بررسی و مطالعه در خصوص تقویت خمشی خارجی با کامپوزیت‌های FRP، ملاحظات طراحی، شناسایی انواع مودهای شکست در تقویت خمشی و چگونگی دست یابی به مود شکست شکل پذیر.

۲- مطالعه در رابطه با چگونگی تخمین میزان شکل پذیری انحنایی در مقاطع تقویت نشده و تقویت شده، و به دست آوردن رابطه‌ای مناسب جهت تعیین شکل پذیری انحنایی مقاطع تقویت شده.

۳- شناسایی و مطالعهٔ روش‌های تخمین میزان بازتوزیع لنگر در اعضای خمشی سراسری بتن‌آرمهٔ تقویت نشده و توسعهٔ رابطه‌ای مناسب جهت تخمین میزان بازتوزیع لنگر در این‌گونه اعضاء.

۴- ساخت مدل‌های تحلیلی در نرم افزار ANSYS، از قاب‌های دو دهانهٔ تقویت نشدهٔ کنترلی و هم‌چنین قاب‌های دو دهانه که تیرهای آن در نواحی تحتانی وسط دهانه و فوقانی تکیه‌گاه میانی قاب با ورق CFRP

تقویت شده‌اند، با در نظر گرفتن متغیرهای اشاره شده در بند چهارم قسمت ۱-۳، به منظور تخمین اولیهٔ ظرفیت باربری و خمشی در قاب های با و بدون ورق تقویت.

۵- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از قاب‌های دو دهانهٔ بتن آرمه، تقویت خمشی آن‌ها در محل‌های لازم، و بارگذاری استاتیکی آن‌ها تا مرحلهٔ شکست جهت ارزیابی و تعیین میزان شکل پذیری و بازتوزیع لنگر در قاب‌های با و بدون ورق تقویت.

۶- کالیبراسیون نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی قاب‌ها در نرم افزار ANSYS، بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش قاب‌های بتن‌آرمهٔ با و بدون ورق تقویت.

۷- مطالعهٔ پارامتری با ساخت مدل‌های تحلیلی دیگر در نرم افزار ANSYS، جهت ارزیابی میزان شکل پذیری و بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری تقویت شده، با توجه به در نظر گرفتن سایر متغیرهای ذکر شده در بند پنجم قسمت ۱-۳.

۸- تلاش جهت ارائهٔ رابطه‌ای مناسب برای تخمین میزان بازتوزیع لنگر در قاب‌های بتن‌آرمهٔ سراسری تقویت شده با ورق‌های CFRP.

۱-۵- معرفی اجمالی نمونه‌های تجربی

در این قسمت مشخصات نمونه قاب‌های آزمایشگاهی، به طور مختصر معرفی می‌شوند. نمونه‌ها به دو گروه اصلی A و B از نظر نحوهٔ فولاد گذاری تقسیم می‌گردند. در نمونه‌های گروه A، مقدار فولاد تحتانی و فوقانی مقطع تیر حدود $0.40\rho_b$، و در نمونه‌های گروه B، مقدار فولاد تحتانی و فوقانی به ترتیب حدود $0.40\rho_b$ و $0.20\rho_b$، وبه صورت سراسری در طول تیر می‌باشند؛ که ρ_b میزان فولاد متوازن مقطع بتن آرمه می‌باشد. نمونه‌های گروه A مشتمل بر یک نمونهٔ تقویت نشدهٔ کنترلی و چهار نمونهٔ تقویت شده با ورق CFRP، و نمونه‌های گروه B نیز مشتمل بر یک نمونهٔ کنترلی و پنج نمونهٔ تقویت شده با ورق CFRP هستند. نمونه‌های تقویت شدهٔ هر گروه، از نظر آرایش ورق تقویت با یکدیگر متفاوت بوده و به جز استفاده از مهار U شکل انتهایی ورق و مهار U شکل در محل گوشهٔ اتصال تکیه‌گاه میانی، فاقد هر نوع مهار مکانیکی دیگری می‌باشند. البته لازم به ذکر است، در نمونهٔ آخر هر گروه، علاوه بر تقویت هم زمان ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه، و استفاده از مهارهای U شکل فوق‌الذکر، از مهار مکانیکی نیز با به کار گرفتن تسمه و پیچ فولادی، در طول ورق تقویت تحتانی و در محل پخ ورق تقویت فوقانی ناحیهٔ تکیه‌گاه استفاده شده است. بنابراین با توجه به توضیحات فوق ، ۱۱ نمونهٔ تجربی با مشخصات زیر ساخته و مورد آزمایش قرار خواهند گرفت:

۱- نمونهٔ A0UGZ مشتمل بر 3Φ12 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب و بدون هر گونه ورق تقویت.

۲- نمونهٔ A1HGZ مشتمل بر 3Φ12 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و دو لایه ورق CFRP به ترتیب در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی.

۳- نمونهٔ A2HGZ مشتمل بر 3Φ12 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و چهار لایه ورق CFRP به ترتیب در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی.

۴- نمونهٔ A4HGZ مشتمل بر 3Φ12 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و چهار لایه ورق CFRP فقط در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه تیرهای قاب.

۵- نمونهٔ A5HGZ مشتمل بر 3Φ12 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و دو لایه ورق CFRP به ترتیب در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی، به همراه استفاده از مهار مکانیکی تسمه و پیچ (رول بولت) فولادی.

۶- نمونهٔ B0UGZ مشتمل بر 3Φ12 و 3Φ8 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب و بدون هر گونه ورق تقویت.

۷- نمونهٔ B1HGZ مشتمل بر 3Φ12 و 3Φ8 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و دو لایه ورق CFRP به ترتیب در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی.

۸- نمونهٔ B2HGZ مشتمل بر 3Φ12 و 3Φ8 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و چهار لایه ورق CFRP به ترتیب در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی.

۹- نمونهٔ B3HGZ مشتمل بر 3Φ12 و 3Φ8 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و دو لایه ورق CFRP فقط در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه تیرهای قاب.

۱۰-نمونهٔ B4HGZ مشتمل بر 3Φ12 و 3Φ8 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و چهار لایه ورق CFRP فقط در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه تیرهای قاب.

۱۱-نمونهٔ B5HGZ مشتمل بر 3Φ12 و 3Φ8 میلگرد سراسری به ترتیب در قسمت تحتانی و فوقانی تیر قاب، و دو لایه ورق CFRP به ترتیب در ناحیهٔ تحتانی وسط دهانه و ناحیهٔ فوقانی تکیه‌گاه میانی، به همراه استفاده از مهار مکانیکی تسمه و پیچ (رول بولت)فولادی.

۱-۶- پیشینهٔ تحقیق

بهسازی و مرمت سازه‌ها با استفاده از ورقه‌های FRP برای اولین بار در سال ۱۹۸۷، به منظور تقویت خمشی پل‌های بتن‌آرمه، توسط مایر در کشور سوئیس آغاز شد. پس از آن، مطالعات فراوانی در سراسر دنیا برای مقاوم سازی سازه‌ها، از طریق چسباندن کامپوزیت‌های FRP به سطح خارجی عضو، انجام گردید. افزایش ناگهانی در استفاده از ورقه‌های FRP، در واقع به بعد از زلزلهٔ هیوگوکن ژاپن در سال ۱۹۹۵ مربوط