چکیده

با وجود استفادهٔ میدانی از ورقه‌های کامپوزیت FRP، هنوز همهٔ جنبه‌های رفتاری این مصالح به صورت کامل شناخته نشده است. از جملهٔ این موارد می‌توان به گسیختگی این ورقه‌ها و علل آن به صورت جدا شدگی از سطح بتن، در بارهای غیر قابل پیش بینی و زودرس اشاره کرد. در این تحقیق، ابتدا اثرات آرایش تسلیح داخلی و خارجی، به صورت تجربی و آزمایشگاهی، بر جدا شدگی ورق تقویتی مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس امکان مدل سازی این اثرات توسط برنامه‌های رایج عناصر محدود، بررسی شده است.

به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در طرح، تعداد ۲۴ تیر بتن آرمه در ابعاد مقطع ۳۵۰ × ۳۰۰ میلی متر و طول ۳۳۰۰ میلی متر، به صورت دو سر ساده و تحت بار خمش سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های آزمایشی به لحاظ میزان آرماتور کششی به دو نوع I و II تقسیم می‌شوند. سطح مقطع آرماتور کششی در نمونه‌های نوع I، حدود ۷۶۵ میلی متر مربع و در نمونه‌های نوع II، حدود ۱۲۳۰ میلی متر مربع در نظر گرفته شده است. از تعداد ۲۴ نمونهٔ آزمایشی، ۴ نمونه به عنوان تیرهای شاهد آزمایش گردید. ۲۰ نمونهٔ آزمایشی دیگر، مطابق با اهداف مورد نظر در این تحقیق، در ۴ گروه آزمایشی به شرح زیر تقویت و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

گروه (۱) شامل ۶ تیر بتن آرمه از نوع I و ۲ تیر بتن آرمه از نوع II است، که به منظور بررسی تاثیر آرایش میلگردهای کششی بر جدا شدگی ورق تقویتی آزمایش شده‌اند. در تیرهای تقویت شدهٔ نوع I، از سه آرایش آرماتور گذاری شامل 2Φ22، 3Φ18 یا 5Φ14، و در تیرهای نوع II، از دو آرایش 2Φ28 یا 3Φ16 & 2Φ20 برای آرماتورهای ناحیهٔ کششی مقطع استفاده شده است. هم‌چنین به منظور بررسی اثرات وجود پیش ترک در نمونه‌ها، در بار جدا شدگی، نیمی از تیرهای نوع I در این گروه، قبل از تقویت تا حدود ۶۰٪ ناحیهٔ خطی و الاستیک منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌های شاهد، تحت بار گذاری قرار داده شده‌اند. سپس از این نمونه‌ها، بار برداری به صورت کامل انجام شده است و پس از تقویت با ورقه‌های FRP و عمل آوری لازم، مجددا تا بار نهایی، تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار داده شده‌اند. در گروه (۲) آزمایشات اثرات تقویت خارجی، بر جدا شدگی ورق تقویتی شامل تعداد لایه‌ها و هم‌چنین تعداد نوارهای ورق مورد بررسی قرار گرفته است. گروه (۳)، به بررسی اثرات قطع یا خم میلگردهای کششی در بار جدا شدگی و رفتار ترک خوردگی تیرهای بتن آرمهٔ تقویت شده با صفحات CFRP، اختصاص داده شده است. ایجاد قطع و خم میلگردهای خمشی، موضوعی است که معمولا به دلیل صرفه جویی بیشتر در مصرف میلگرد، در همهٔ پروژه‌های اجرایی انجام می‌شود. این گروه شامل ۵ تیر بتن آرمه از نوع I است که در هر یک از نمونه‌ها از ۵ عدد میلگرد Φ14، به عنوان آرماتور کششی، در محل حداکثر لنگر خمشی تیر استفاده شده است. در این گروه، برای تقویت تیرها، دو لایه ورق CFRP به عرض ۱۵۰ میلی متر و طول ۲۷۰۰ میلی متر در حد فاصل بین دو تکیه‌گاه تیر به وجه کششی تیر چسبانده شده است. در این نمونه‌ها قطع و خم آرماتور با میزان ۲۰ و ۶۰ درصد انجام شده است. برنامهٔ آزمایش گروه (۵)، به اثرات ایجاد شیار بر بار جدا شدگی و رفتار نمونه‌های تقویت شده در مقیاس واقعی و با تسلیح داخلی، اختصاص داده شده است. در این گروه ۵ تیر بتن آرمه شامل ۴ نمونه از تیرهای نوع I، و یک نمونه از تیرهای نوع II، با روش شیار زنی تقویت و آزمایش شده است. در آزمایشات این گروه عوامل متعددی نظیر تاثیر عمق شیار، تعداد لایه‌های ورق تقویتی، میزان فولاد کششی تیر، پیوستگی و ناپیوستگی شیارها و اثرات نوع چسب برای پر کردن شیارها مورد بررسی قرار گرفته است.

مقایسهٔ نتایج آزمایشات انجام شده در گروه‌های مختلف آزمایشی، شامل گروه‌های تسلیح داخلی و خارجی تیرهای بتن آرمهٔ تقویت شده با صفحات CFRP، نشان می‌دهد که برخی از پارامترهای مورد نظر، تاثیرات قابل توجهی در رفتار نمونه‌های تقویتی ایجاد می‌نمایند، که لازم است در طراحی لحاظ شوند. از جملهٔ این پارامترها می‌توان به ۱) اثرات تغییر قطر و تعداد میلگردهای کششی در مقاومت چسبندگی بتن در موضع اتصال ورقه‌های تقویت خمشی، ۲) درصد قطع میلگردهای خمشی و موضع قطع آرماتور در نوع جدا شدن ورق تقویتی، ۳) تاثیر ایجاد شیار به عنوان روشی برای جایگزینی آماده سازی سطحی در ظرفیت بار پذیری نمونه‌های تقویت شده و الگوی ترک‌های ایجاد شده در تقویت‌های خمشی و هم‌چنین ۴) تاثیر نحوه و میزان تسلیح خارجی ورق در تعویق یا تسریع جدا شدگی ورق CFRP، اشاره نمود.

علاوه بر آن مدل سازی نمونه‌ها با استفاده از روش عناصر محدود و با در نظر گرفتن امکان جدا شدگی ورق تقویتی، نشان داد که هم خوانی مناسبی بین نتایج آزمایشی و تئوری وجود دارد.

کلمات کلیدی: تیر بتن آرمه، تقویت خمشی، CFRP، جدا شدگی ورق، آرایش میلگرد، فواصل ترک، عرض ترک، قطع آرماتور

فصل اول
کلیات و تعریف موضوع

۱-۱ کلیات

تقویت و مرمت سازه‌ها از دیرباز یکی از زمینه‌های پویا در کارهای ساختمانی محسوب می‌شده است. این کار به خصوص در مورد آثار و ابنیه‌ی تاریخی از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. دلایل متعددی را می‌توان برای ضرورت انجام تقویت برشمرد که به طور خلاصه می‌توان آن‌ها را از دو جنبه‌ی مختلف مورد بررسی قرار داد. جنبه‌ی اول را می‌توان در افزایش ظرفیت بار پذیری و یا بهبود شرایط بهره برداری، بدون تغییر در آیین نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی خلاصه کرد. افزایش تعداد طبقات یک ساختمان، افزایش حجم ترافیک اعمالی به پل‌ها، تغییر کاربری سازه‌ها و یا کاهش میزان تغییر شکل تیر از موارد و مصادیق این جنبه‌ی تقویت است. جنبه و دیدگاه دوم، حاکم بر شرایطی است که از تغییرات در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی ناشی می‌شود. این تغییرات که عموما به دلیل درک بهتر محققین از نیروهای جانبیِ عمل کننده بر ساختمان صورت می‌گیرد، باعث ایجاد تغییراتی در روند طراحی می‌شود. در بیش‌تر اوقات سازه‌های طراحی شده با آیین نامه‌های قبل، قادر به مقاومت در برابر نیروهای آیین نامه‌ای جدید نیستند و لذا در این موارد، تقویت سازه‌های موجود ضروری به نظر می‌رسد. مطابق گزارش منتشر شده‌ی اداره‌ی کل فدرال بزرگ راه‌های آمریکا، بیش از ۴۰٪ از پل‌های بزرگ راه‌ها در این کشور، احتیاج به جایگزینی یا نوسازی دارند [۱]. به علاوه بسیاری از این پل‌ها برای حجم ترافیک‌های کم‌تر، نسبت به بارهای فعلی طراحی شده‌اند و لذا نوسازی به تنهایی نمی‌تواند مشکل این قبیل پل‌ها را حل نماید؛ از این رو تقویت پل‌ها در کنار نوسازی آن‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در گزارش جدیدتری از بونانسی و مالج [۲]، تعداد پل‌های محتاج به بازسازی و تعمیر در آمریکا ۲۳۰,۰۰۰، از مجموع ۵۷۵,۰۰۰ پل، ذکر شده است. هم‌چنین هزینه‌ی جایگزینی پل‌های صدمه دیده در انگلیس ۷,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ پوند و هزینه‌ی سالیانه‌ی نگهداری آن‌ها ۱۶۰,۰۰۰,۰۰۰

پوند تخمین زده می‌شود. این اعداد و ارقام اهمیت تحقیق در خصوص یافتن راه حل‌های مناسب، اقتصادی و سریع برای تقویت سازه‌های موجود را نشان می‌دهد.

برای افزایش مقاومت، روش پس کشیدگی به صورت خارجی[1] بر خلاف وجود معایب عملی، به صورت موفق در ساختمان‌ها و پل‌های موجود مورد استفاده قرار گرفته است [۳-۶]. از جمله‌ی این معایب می‌توان به مشکلات مهار کابل‌های پیش تنیده، تامین پایداری جانبی تیر در حین عمل پس کشیدگی و حفاظت کابل‌های استفاده شده در مقابل خوردگی اشاره کرد [۷].

از دیگر روش‌های موثر تقویت می‌توان به اتصال ورقه‌های فلزی به تیرهای بتن آرمه [2] اشاره نمود. از این روش در اروپا، آفریقای جنوبی و ژاپن برای افزایش ظرفیت باربری تیرهای اصلی پل‌های موجود استفاده شده است [۳ و ۸]. این روش تقویت توسط محققین و متخصصین، اقتصادی و موثر ارزیابی شده است [۷]. تکنیک استفاده از چسب برای اتصال ورقه‌های فلزی به وجوه کششی تیر، نسبتا ساده بوده و باعث افزایش مقاومت و سختی تیر می‌شود. مزایای این روش شامل سهولت نسبی اجرا و حذف مهارهای خاص مورد نیاز در روش پس کشیدگی است. در این روش، انجام تقویت در ضمن بهره برداری از سازه، امکان پذیر بوده و انجام تقویت، ظاهر ساختمان، نسبت ابعادی اعضای سازه‌ای و ارتفاع موثر طبقات را تغییر نمی‌دهد. از معایب این روش می‌توان به سنگینی ورقه‌های فلزی و لزوم استفاده از جراثقال‌های خاص برای نصب و هم‌چنین از همه مهم‌تر خطر خوردگی فلز و زوال لایه‌ی مرزی چسب و از بین رفتن تدریجی اتصال بین ورق وبتن، به خصوص در هنگام استفاده از این شیوه‌ی تقویت در محیط‌های باز و مرطوب، اشاره کرد [۷].

گرچه مطالعات و تجربیات گذشته تاثیر این روش تقویت را در بهبود عملکرد خمشی تیرهای بتن آرمه با افزایش مقاومت و صلبیت و کاهش عرض ترک‌های خمشی تیر به اثبات رسانده است، ولی معایب این شیوه‌ی تقویت به خصوص اضمحلال تدریجی چسب در اثر پدیده‌ی خوردگی فلز، ایده‌ی جایگزینی ورق فلزی را با ورقه‌های FRP مطرح نموده و از دو دهه‌ی قبل توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف داشته است. مزایای قابل توجه این روش تقویت از جمله نسبت مقاومت به وزن زیاد، نسبت سختی به وزن زیاد، سبکی ورقه های FRP در مقایسه با ورقه‌های فولادی، سهولت اجرا، کاربرد در سطوح با اشکال متنوع و خاص به همراه مزایای مربوط به ورقه‌های فلزی و از همه مهم تر دوام و مقاوم بودن ورقه‌های FRP نسبت به محیط‌های مرطوب و خورنده باعث شده است که این شیوه به خوبی جایگاه خود را در بین سایر روش‌های تقویت در جهان امروزی تثبیت نماید.

تا کنون تحقیقات گسترده و همه جانبه‌ای در خصوص کاربرد ورقه‌های FRP در انجام تقویت سازه‌های بتن‌آرمه، چه به صورت ساخت و آزمایش نمونه‌های تجربی و آزمایشگاهی و چه به صورت مدل‌های عددی، توسط محققین مختلف انجام شده است، که نتایج آن منجر به درک بهتر مهندسین از رفتار واقعی‌تر این نوع مصالح در بحث تقویت سازه‌ها گردیده است. رشد تحقیقات و یافته‌های علمی در این زمینه به حدی است که هم اکنون آیین نامه‌های

---

1 External Post-tensioning
2 Epoxy-bonded Steel Plate

مستقلی در این خصوص تدوین شده و برخی از آیین‌نامه‌های سازه‌های بتن‌آرمه، بخش‌هایی را به طراحی و عملکرد این نوع مصالح جدید اختصاص داده‌اند.

بر خلاف همه‌ی تلاش‌ها و زحمات انجام شده، وجود برخی تضادها و چندگانگی‌ها در نتایج تجربی حاصل از فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینه‌ی تقویت سازه‌های بتن آرمه با کمک ورقه‌های FRP، و همچنین عدم صراحت آیین نامه‌های مرتبط در مورد برخی از شبهات طراحی، باعث شده است که میدان تحقیق در این زمینه، گسترده‌تر از قبل و با جدیت و سرعت بیش‌تری در حال انجام باشد. در همین راستا برنامه‌ی تحقیقاتی موجود در نظر دارد با مطالعه‌ی تئوری و تجربی زمینه‌های نه چندان آشکار و واضح رفتار این نوع مصالح تقویتی، زمینه را برای درک بهتر از رفتار این نوع مصالح هموارتر سازد.

۱-۲ زمینه‌ی تحقیق حاضر

از زمان ابداع بتن آرمه تا کنون، تحقیقات بسیار زیادی در زمینه‌ی رفتار این نوع از سازه‌ها انجام شده است؛ ولی به عقیده‌ی بسیاری از متخصصان فن، هنوز ناشناخته‌های بسیاری در زمینه‌ی رفتار اجزاء بتن آرمه وجود دارد. به عبارت دیگر ماهیت متفاوت مواد تشکیل دهنده‌ی سازه‌ی بتن آرمه یعنی فولاد و بتن، رفتار متفاوت این دو نوع ماده در بارگذاری‌های معمول و غیر معمول، ناهمگنی جسم بتن، پتانسیل ایجاد ترک خوردگی در بتن، وجود تغییرات حجمی وابسته‌ی به زمان در بتن و ده‌ها مسئله‌ی دیگر، باعث شده است که موضوع تحقیق در خصوص مسائل سازه‌های بتن آرمه در حال حاضر نیز یکی از زمینه‌های پویای تحقیقاتی در دانشگاه‌های معتبر جهانی و مراکز پژوهشی دنیا باشد. واضح است که اضافه شدن مواد دیگر، به ویژه با خصوصیات کاملا متفاوت با مواد متشکله قبلی (چسب و الیاف پلاستیکی)، می‌تواند باعث پیچیدگیِ بیش‌تر موضوع شود.

هر چند بازه‌ی زمانیِ استفاده و کاربرد مواد کامپوزیت در تقویت سازه‌های بتن آرمه آن چنان زیاد نیست؛ ولی تحقیقات بسیار زیادی در خصوص رفتار هر یک از مواد و تعامل و اندر کنش مواد مختلف آن صورت گرفته است؛ که نتیجه‌ی این تحقیقات منجر به شناخت بهتر رفتار این جسم مرکب گردیده است. با این وجود، پیچیدگی موضوع به حدی است که در بسیاری از موارد مورد مطالعه، هنوز جواب‌های قانع کننده‌ای برای محققان حاصل نشده است. از جمله‌ی این موارد می‌توان به رفتار ترد و غیر شکل پذیر سازه‌های بتن آرمه‌ی خمشیِ تقویت شده با صفحات FRP، اشاره نمود [۹-۱۱]. تیرهای تقویت شده با ورقه‌های FRP در مقایسه با تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت نشده، دارای ظرفیت بار پذیری بیش‌تر می‌باشند؛ ولی در مقابل، ظرفیت تغییر شکل کم‌تری را از خود نشان می‌دهند که چندان مطلوب نیست. علاوه بر آن پدیده‌ی جدا شدن نابهنگام ورق FRP از سطح بتن، موضوع مهمی است که به تنهایی، عنوان چندین کنفرانس بین- المللی علمی و تخصصی در زمینه‌ی کاربرد کامپوزیت‌ها در صنعت ساختمان را در دهه‌ی اخیر، به خود اختصاص داده است.

جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن، مختص به تقویت خمشی تیر نیست و در مورد تقویت‌های برشی نیز این مسئله دیده می‌شود. از آن جا که جدا شدگی ورق تقویتی FRP از سطح بتن در بارهای کم‌تر از مقدار بار قابل پیش بینی، با تئوری های موجود مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده انجام می‌شود، لذا این پدیده از دید عموم محققان یک پدیده‌ی نامطلوب تلقی می‌گردد. گسیختگی جدا شدن ورق یکی از شایع‌ترین حالات گسیختگی تیرهای بتن

آرمه تقویت شده با ورقه‌های FRP است. در یک جمع آوری انجام شده از بین ۶۴ نمونه‌ی موجود در ۱۰ مطالعه‌ی تحقیقاتی جداگانه، در صد حالات گسیختگی برشی، فشاری و پارگی ورق FRP به ترتیب ۸٪، ۶٪ و ۲۲٪ گزارش شده است؛ در حالی که گسیختگی جدا شدن ورق تقویتی به تنهایی ۶۴٪ حالات گسیختگی را به خود اختصاص می‌دهد [۱۲].

با توجه به اهمیت موضوع، جلوگیری از وقوع پدیده‌ی جدا شدگی، به تعویق انداختن این حالت گسیختگی، پیش بینی مناسب آن در عمل و در تئوری، مدل سازی مناسب از این پدیده و بررسی پارامترهای تاثیر گذار در آن، از عناوین و سرفصل‌های بسیاری از تحقیقات زنده‌ی روز دنیا محسوب می‌شود. در این ارتباط، تاثیر عوامل مختلف و تاثیر گذار در وقوع پدیده جدا شدگی توسط محققین مکررا آزمایش، تحلیل و مورد بررسی قرار گرفته است. از نمونه عوامل تاثیر گذار می‌توان به مقدار میلگردهای موجود در تیر، ضخامت ورق تقویتی، طول ورق تقویتی و موقعیت قطع ورق تقویتی از انتهای تیر اشاره کرد.

در حال حاضر دیدگاه نسبتا تازه‌ای در خصوص وقوع پدیده‌ی جدا شدگی ورق تقویتی از سطح بتن در بین محققان مورد پذیرش قرار گرفته است. این دیدگاه وجود ناپیوستگی در بتن و یا در ورق تقویتی را عاملی برای بروز این پدیده معرفی می‌کند. به عبارت دیگر قطع ورق در انتهای تیر باعث وجود ناپیوستگی در ورق شده و این مسئله پتانسیل جدا شدگی ورق در انتهای تیر را افزایش می‌دهد. همچنین بروز ترک در تیر، در محل اعمال بار یا در محل لنگر خمشی حداکثر، یک ناپیوستگی در جسم بتن ایجاد می‌کند که حاصل آن تشدید و شروع پدیده‌ی جدا شدگی ورق از ناحیه‌ی میانی تیر و انتشار آن به سمت تکیه‌گاه است [۱۳- ۱۷].

با توجه به این دیدگاه به نظر می‌رسد که نحوه‌ی آرایش میلگردهای داخلی تیر بتن آرمه و هم‌چنین مسئله‌ی قطع و خم میلگردهای خمشی، که به لحاظ صرفه جویی بیش‌تر در مصرف فولاد در قطعات بتن آرمه، به خصوص تیرها و دال‌های بتن آرمه صورت می‌گیرد، خود نوعی ناپیوستگی در تیر را ایجاد می‌نماید؛ که می‌تواند در شروع پدیده‌ی جدا شدگی و یا تسریع آن تاثیر گذار باشد. به عبارت دقیق‌تر، با تغییر آرایش فولاد گذاری در تیر و یا قطع تعدادی از آرماتورها و یا خم کردن آن‌ها، توزیع تنش و کرنش در طول و مقطع تیر بتنی دچار تغییراتی می‌شود. این تغییرات در نحوه‌ی ترک خوردگی و فواصل ترک در تیر تاثیر گذاشته و به گونه‌ای پدیده‌ی ناپیوستگی در تیر ایجاد می‌شود. از این رو در این تحقیق درصدد هستیم که با تغییر پارامترهای مختلف که حاصل آن‌ها می‌تواند باعث تشدید یا تخفیف در این نوع ناپیوستگی در تیر و اعضای خمشی گردد، نقش عوامل دخیل را به صورت کمی و کیفی مورد ارزیابی قرار دهیم.

۱-۳ اهداف این تحقیق

چنان‌چه در قسمت قبل عنوان شد عوامل موثر در ناپیوستگی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با صفحات FRP می‌توانند در جدایش ورق تقویتی تاثیر گذار باشند. این تاثیر می‌تواند در مقدار بار قابل تحمل عضو و یا در رفتار و عملکرد عضو در مقابله با بارهای اعمالی احتمال وقوع پیدا کند. بدیهی است با شناخت عوامل گسستگی و هم‌چنین نحوه‌ی تاثیر عوامل فوق در بار یا نحوه‌ی رفتار عضو در حین بارگذاری، می‌توان با اتخاذ تدابیر مناسب، از وقوع جدا شدگیِ زودرس ممانعت کرد و یا تا حد ممکن آن را به تعویق انداخت.

با توجه به موارد فوق، اهم اهداف این تحقیق در مورد تیرهای تقویت شده‌ی خمشی با ورقه‌ی FRP، به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱) بررسی تاثیر تعداد و قطر آرماتورهای داخلیِ بتن در وقوع پدیده‌ی جدا شدگی ورق تقویتی.
۲) ارزیابی اثرات آرایش ورقه‌ی FRP در وجه کششی بتن در وقوع پدیده‌ی جدا شدگی ورق.
۳) تاثیر قطع میلگردهای خمشی مازاد در تیر در شروع، نحوه و محل وقوع جدا شدگی.
۴) تاثیر خم کردن آرماتورهای خمشی مازاد در تیر در شروع، نحوه و محل وقوع جدا شدگی.
۵) بررسی تاثیر ترک‌های موجود در تقویت خمشی و جدا شدگی ورق در تیرهای صدمه دیده، با در نظر گرفتن آرایش‌های مختلف تسلیح داخلی.
۶) بررسی راهکارهای مناسب برای جلوگیری یا به تعویق انداختن پدیده‌ی جدا شدگی ورق، در اثر عوامل ذکر شده.

۱-۴ فصل بندی پایان نامه

با توجه به اهداف فوق، موارد انجام شده در قالب این تحقیق در ۱۰ فصل به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

فصل اول به ذکر مقدمه، اهمیت موضوع و کلیاتی در رابطه با تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با صفحات تقویتی CFRP و اهمیت آن در بحث‌های کلان اقتصادی اختصاص داده شده است. هم‌چنین به اهداف این تحقیق در قالب ۶ بند در انتهای فصل اشاره شده است.

در فصل دوم به تاریخچه‌ی تحقیقات قبلی در زمینه‌ی تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با صفحات CFRP اشاره می‌شود. در این بخش ضمن اشاره به روش‌های مختلف تقویت با صفحات کامپوزیتی، به حالات شایع گسیختگی در این نحوه‌ی تقویت اشاره شده و تقسیم بندی‌های انجام شده در این خصوص معرفی خواهد شد. هم‌چنین ادبیات موضوع در قالب دو قسمت جداگانه شامل کارهای تجربی و آزمایشگاهی و مطالعات تئوری در خصوص تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه بیان خواهد شد. در این راستا سعی شده است که حتی الامکان به پیشینه‌ی مطالعات انجام شده، که ارتباط بیش‌تری با مباحث این پایان نامه دارند، اشاره شود. در این فصل هم‌چنین به مدل‌های مختلف جدا شدگی که می‌تواند جدا شدگی انتهای ورق تقویتی، یا جدا شدگی ناشی از باز شدن ترک‌های خمشی-برشی در میانه‌ی تیر را پوشش دهد، اشاره شده است.

در فصل سوم به آزمایشات جانبی لازم که برای ساخت نمونه‌ها، تقویت آن‌ها و انجام آزمایشات اصلی ضروری است، اشاره می‌شود. این آزمایشات شامل تعیین مقاومت مکانیکی میلگردهای مصرفی، منحنی‌های تنش-کرنش میلگردها، مشخصات دانه‌ها، دانه بندی و آزمایشات مقاومت فشاری و کششی بتن و تعیین مدول الاستیسیته‌ی بتن است. علاوه بر آن به آزمایش ساخت کوپن‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های FRP در دو ضخامت متفاوت و هم‌چنین مشخصات مکانیکی این کوپن‌ها اشاره می‌شود. در انتهای فصل سوم نیز به اثرات بر هم کنش چسب برای پر کردن شیار و اشباع الیاف اشاره شده است.

تعریف، ساخت و جزئیات ساخت، مشخصات ظاهری نمونه‌ها، تعداد نمونه‌ها و تجهیزات لازم برای انجام آزمایشات در فصل چهارم مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل‌های پنجم تا نهم این پایان نامه به نتایج عملی و تئوری به دست آمده اختصاص داده شده است. در این خصوص نتایج خام آزمایشات انجام شده بر روی ۲۴ تیر بتن آرمه، با و بدون صفحات تقویت، در فصل پنجم ذکر شده است. در این فصل با توجه به تنوع و تعدد آزمایشات، مطالب درج شده در قالب بخش‌های مختلف، بر اساس اهداف تحقیق تدوین گردیده است. در هر بخش، به حالات گسیختگی مشاهده شده، روند ایجاد و انتشار ترک در نمونه‌ها و وضعیت کرنش‌های ایجاد شده در اجزای مختلف نمونه، شامل کرنش بتن، میلگرد و ورقه‌ی تقویتی و منحنی‌های بار- تغییر مکان نمونه‌ها توجه شده است.

تفسیر نتایج خام حاصل از انجام آزمایشات، در فصل ششم، به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در این فصل نتایج آزمایشات در گروه‌های مختلف آزمایشی با یک‌دیگر مقایسه شده و سعی شده است که دلایل توجیهی کافی در خصوص نتایج کسب شده و اختلاف‌های موجود بین نمونه‌ها، با دلایل علمی و توضیحات کافی ارائه شود.

از آن‌جا که معمولا تعریف، ساخت و انجام آزمایش روی نمونه‌های با مقیاس واقعی، جدای از هزینه‌های بسیار زیاد اقتصادی، فرایندی زمان بر محسوب می‌شود، لذا در فصل هفتم و هشتم، امکان انجام مدل سازی از نمونه‌های آزمایشی، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، برای مدل سازی نمونه‌ها، از نرم افزار ABAQUS، استفاده شده است. در این رابطه، مطالب فصل هفتم، به مدل سازی نمونه‌های تقویت نشده و شاهد و مطالب فصل هشتم، به مدل سازی از نمونه‌های تقویت شده با این نرم افزار، اختصاص داده شده است. در این دو فصل، نتایج مدل سازی‌های انجام شده، با نتایج آزمایشات فصول پنجم و ششم، مقایسه شده است. در همین خصوص، اختلاف احتمالی بین نتایج تحلیل‌های عددی و نتایج آزمایشی، در صورت وجود، به صورت منطقی توجیه شده و برای انطباق نتایج، راهکارها و ضرایب کالیبره‌ی مناسب ارائه شده است.

نتایج آزمایشات انجام شده در فصول پنجم تا هشتم، نشان می‌دهدکه تغییر آرایش آرماتورهای کششی، به لحاظ قطر و فواصل بین آرماتورها، و هم‌چنین تغییر در تسلیح خارجی، می‌تواند اثراتی را در بار جدا شدگی و الگوی ترک خوردگی در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های CFRP، ایجاد نماید. از آن‌جا تعیین این اثرات در مورد نمونه‌های متفاوت و با آرایش‌های مختلف تسلیح، به صورت ساخت و آزمایش نمونه‌های عملی، منطقی و معقول نیست، لذا در فصل نهم سعی شده است که با توجه به نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل‌های تحلیلی و عددی، برای پیش بینی رفتار این اعضا ارائه شود. در این خصوص، در قسمت ابتدای فصل، به روابط تحلیلی برای محاسبه‌ی تنش‌های بین سطحی اشاره شده است. هم‌چنین در قسمت انتهای فصل، با استفاده از روابط مبتنی بر تعادل، مقاومت و همسازی تغییر شکل‌ها، برای محاسبه‌ی عرض باز شدگی ترک در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده، معادلاتی ارائه گردیده و نتایج نمونه‌های آزمایشی و تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته است.

در فصل دهم نیز، شرح کارهای انجام شده به صورت خلاصه، به همراه نتایج آزمایشات و تحلیل‌های عددی آورده شده است.

فصل دوم
پیشینه‌ی علمی موضوع

۲-۱ کلیات

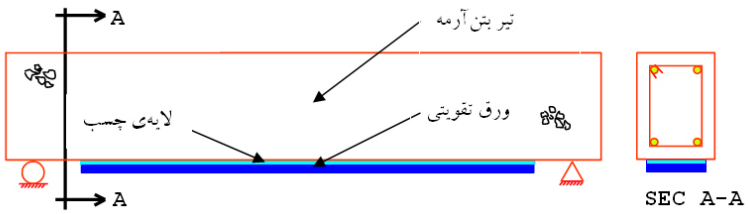
روش‌های سنتی که معمولا برای تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل پس کشیدگی خارجی و اتصال ورق‌های فولادی به تیر است. این روش‌ها، همان طور که قبلا به آن‌ها اشاره شد، دارای معایب ذاتی هستند که می‌توان آن‌ها را از صعوبت در کاربرد تا عدم کفایت دوام طبقه بندی کرد. در سال‌های اخیر استفاده از ورقه‌های FRP به جای ورقه‌های فولادی در تقویت تیرهای بتن آرمه بسیار رایج شده است. استفاده از این شیوه‌ی تقویت برای اولین بار در سوئیس در آزمایشگاه تحقیق و آزمایش مواد در ۱۹۸۰ گزارش شده است [۱۸]. بخش عمده‌ی تحقیقات بر روی تقویت خمشی تیرها با استفاده از متصل کردن ورقه‌های FRP در دهه‌ی اخیر انجام شده است. در این فصل خلاصه‌ای از کارهای تحقیقاتی انجام شده، شامل تحقیقات آزمایشگاهی، تحلیل‌های تئوری و مدل سازی‌های انجام شده در رابطه با موضوع بحث عنوان خواهد شد. در این خصوص و به منظور ارائه‌ی یک ترتیب منطقی در بیان ادبیات موضوع، ابتدا به روش‌های مختلف تقویت خمشی با استفاده از ورق‌های تقویتی اشاره می‌شود و سپس مودهای مختلف گسیختگی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق‌های FRP مطرح و در ادامه به پیشینه‌ی علمی موضوع پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از مصالح FRP، فقط محدود به تقویت، تعمیر و یا باز سازی سازه‌ها نمی‌شود. این مصالح را می‌توان برای ساخت سازه‌های جدید نیز استفاده کرد. به عنوان نمونه، در حال حاضر تندان‌های پیش کشیده، پروفیل‌های جدید، میلگردها و کابل‌های از جنس FRP در سازه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند و یا ساخت و استفاده از آن‌ها، تحت مطالعات و بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی است [۱۹-۲۳].

تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، عموما با استفاده از اتصال ورق FRP به وجه کششی تیر انجام می‌شود. قبل از نصب ورق FRP، آماده سازی موضع نصب ورق از اهمیت خاصی برخوردار است. تقریبا همهٔ محققین، اتصال و پیوستگی ورق به سطح بتن را متاثر از آماده سازی سطحی و کیفیت بتن می‌دانند [۲۴-۲۵]. آماده سازی سطح بتن می‌تواند با برداشت لایه‌ی سطحی بتن ضعیف، توسط سائیدن سطح انجام شود. هم‌چنین نمایان سازی دانه‌های شن و ماسه برای توسعه‌ی چسبندگی بیش‌تر، با ماسه پاشی، فشار آب و یا انجام مکش به منظور فراهم کردن یک سطح هموار صورت می‌گیرد.برخی از مراجع، حتی استفاده از اسیدهای ضعیف بر روی سطح بتن یا ورق‌های تقویتی را برای خنثی سازی سطح، قبل از اتصال ورقه‌های FRP توصیه کرده‌اند [۷]. تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با ورقFRP، می‌تواند به شکل ساده و معمول یا با اعمال پیش کشیدگی در ورق FRP قبل از اتصال آن به سطح تیر و یا با فراهم آوردن مهار لازم، مثل نوارهایU شکل در انتهای ورق، برای کاهش احتمال گسیختگی جدا شدگی ورق از سطح تیر انجام شود.

معمولا نوع مرسوم تقویت خمشی تیرها، مطابق شکل ۲-۱ استفاده از ورق ساده‌ی FRP است. در این روش از سه شیوه برای چسباندن ورق به وجه کششی تیر استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل اتصال ورق‌های FRP پیش ساخته[1]، روش درجا[2] و روش تزریق چسبی[3] است.

در شیوه‌ی اول، ورق‌های FRP پیش ساخته را به قطعات با ابعاد مورد نیاز بریده و به وجه کششی تیر متصل می‌کنند. این حالت به لحاظ کنترل کیفیت از بقیه‌ی روش‌ها بهتر و به لحاظ یکنواختی نیز از درجه‌ی بهتری برخوردار است. شیوه‌ی درجا از معمول‌ترین شیوه‌های اتصال ورقه‌های FRP به وجه کششی تیر است؛ زیرا بیش‌ترین انعطاف پذیری را در مورد اتصال ورقه‌های FRP در عمل فراهم می‌آورد. هم‌چنین این شیوه از بقیه‌ی روش‌ها ارزان‌تر تمام می‌شود [۲۶]. در این روش چسب به سطح بتن اندود شده وسپس لایه‌های FRP در محل به وسیله غلتک، کاملا در چسب غوطه‌ور می‌گردند. چسب به عنوان یک ماتریس و پوشش برای FRP محسوب شده و چسبندگی لازم را با تیر بتن آرمه ایجاد می‌نماید. این شیوه به ناهمواری سطح اتصال حساس بوده و ممکن است ناهمواری سطح منجر به جدا شدگی ورق گردد [۲۷].

شیوه‌ی تزریق چسبی مشابه روش درجا است و توسط محققینی مثل وارسته‌پور و هامیلون [۲۸] به کار برده شده است. این شیوه در عمل کم‌تر استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱ تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق ساده‌ی FRP در وجه کششی

[1] Prefabricated/pultruded FRP plates
[2] Wet lay-up
[3] Resin Infusion

روش دوم تقویت خمشی، استفاده از مهارهای انتهایی برای اتصال ورقه‌های ساده‌ی FRP به وجه کششی تیر است. با این شیوه تا حد زیادی از جدا شدگی ناحیه‌ی انتهایی ورق از روی تیر جلوگیری می‌شود. برای مهار انتهایی می‌توان از اتصال نوارهای پیش ساخته‌ی U شکلِ FRP یا نوارهای فلزی که به کمک بولت یا چسب به سطح بتن متصل می‌شوند، استفاده کرد. هم‌چنین می‌توان از بولت‌های فولادی نیز برای اتصال مستقیم ورق به وجه کششی تیر استفاده کرد [۲۹-۳۱]. نوار مهار انتهایی می‌تواند از نوع درجا، به صورت دورپیچ کامل یا جزیی و با آرایش‌های مختلف نیز انجام شود.

تحقیقات تجربی انجام شده توسط محققین نشان می‌دهد که مهار انتهایی، شروع مسئله‌ی جدا شدگی ورق را از سطح کششی تیر به تاخیر می‌اندازد، ولی آن را حذف نمی‌کند [۳۲].

روش سوم تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه، استفاده از ورقه‌های پیش‌کشیده‌ی FRP است. مهم‌ترین مزیت این روش تقویت، مشارکت ورق متصل شده به تیر در ظرفیت باربری، قبل از اعمال بار اضافی بر روی سازه است. هم‌چنین پیش کشیدگی به کاهش عرض ترک‌ها در تیر نیز کمک می‌کند. از آنجا که نوارهای FRP دارای مقاومت کششی زیاد هستند، پیش کشیدگی منجر به استفاده‌ی بهینه‌تر از آن‌ها در عمل می‌شود.

این شیوه‌ی تقویت به دلیل لازم داشتن ملاحظات ویژه در طراحی و نیاز به ساختار مناسب برای مهار ورق، بیش‌تر جنبه‌ی آزمایشگاهی داشته و کم‌تر در موارد عملی از آن استفاده می‌شود.

۲-۲ حالات گسیختگی

تا کنون تعداد زیادی از حالات گسیختگی برای تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق ساده‌ی FRP در مطالعات آزمایشگاهی مشاهده شده است. این حالات گسیختگی بسیار متنوع بوده و برخی از محققین این حالات را بیش از ۳۰ مورد عنوان کرده‌اند [۳۳]. حالات گسیختگی در حالت کلی می‌تواند بر حسب تداوم عملکرد مرکب بین ورق تقویتی و بتن، به دو دستهٔ کلی تقسیم می‌شود. چنان‌چه اتصال و پیوستگی ورق تقویتی تا حصول بار نهایی حفظ شود، گسیختگی نمونه بسته به میزان میلگردهای خمشی و مقاومت برشی تیر به یکی از سه حالت زیر انجام می‌شود:

۱) گسیختگی خمشی با پارگی FRP[1]

۲) گسیختگی خمشی با خرد شدگی بتن[2]

۳) گسیختگی برشی[3]

در این رابطه چنان‌چه اتصال ورق تقویتی بر روی سطح بتن تا حصول بار نهایی حفظ نشود، گسیختگی زودرس تیر بتن آرمه در اثر جدا شدگی ورق تقویتی انجام می‌شود که می‌توان آن را به صورت‌های زیر تقسیم بندی نمود:

۱) جدا شدگی پوشش بتن[4]

۲) جداشدگی بین سطحی انتهایی ورق[1]

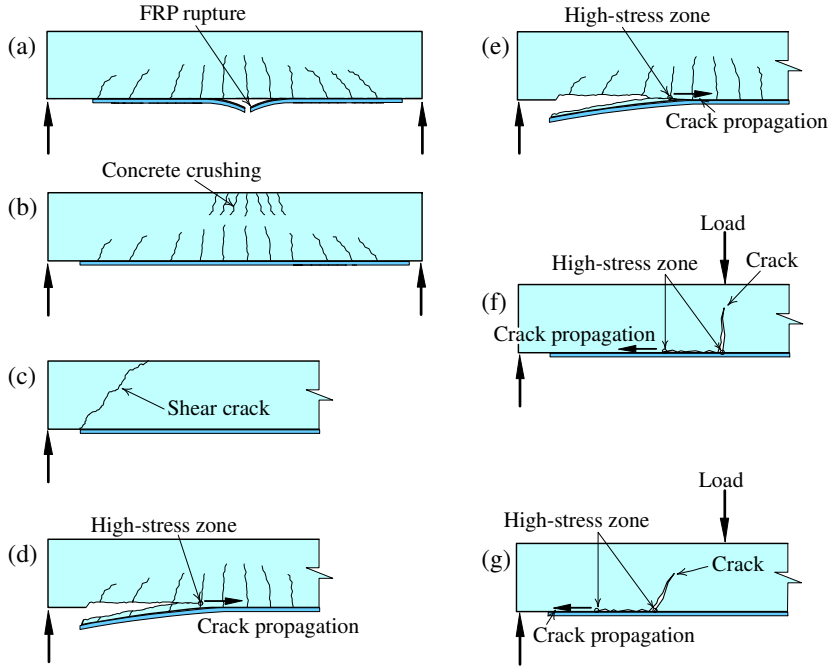
---

[1] Flexural Failure by FRP Rupture
[2] Flexural Failure by Crushing of Compressive Concrete
[3] Shear Failure
[4] Concrete Cover Separation

۳) جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی خمشی[۲]

۴) جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک برشی- خمشی[۳]

وضعیت شماتیک انواع گسیختگی‌های مورد نظر در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. از بین حالت گسیختگی فوق، حالات (b) و (c) در تیرهای بتن آرمه‌ی معمولی نیز مشاهده می‌شود؛ ولی سایر حالات مربوط به تیرهای بتن آرمه‌ی با اتصال ورقه‌های FRP است. در اصطلاح، حالات گسیختگی (d) و (e) گسیختگی جدا شدگی انتهایی ورق[۴] نامیده می‌شوند. در حالت (d)، پوشش بتن نیز به همراه ورق تقویتی از سطح تیر جدا می‌شود؛ در حالی که در حالت (e)، غشاء نازکی از بتن به سطح ورق متصل است. حالات گسیختگی (f) و (g) نیز با عنوان جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی[۵] شناخته می‌شوند. به استثناء گسیختگی جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی (حالت f)، که در یک روند نسبتا طولانی مدت برای انتشار جدا شدگی انجام می‌شود، سایر حالات گسیختگی در یک روند ترد به وقوع می‌پیوندند. این موضوع به خصوص در مورد جدا شدگی در انتهای ورق (حالت d) بیش‌تر مشهود بوده و این نوع گسیختگی معمولا بدون هیچ گونه نشانه‌ی آشکار یا با نشانه‌ی بسیار کم حادث می‌شود [۳۲].



شکل ۲-۲ حالات گسیختگی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های FRP [۳۲]

---

[1] Plate-end Interfacial Debonding
[2] Intermediate Flexural Crack-induced Interfacial Debonding
[3] Intermediate Flexural Shear Crack-induced Interfacial Debonding
[4] Plate-end Debonding Failure
[5] Intrmediate Crack-induced Interfacial Debonding Failure

این‌که کدام‌یک از حالات گسیختگی برای یک تیر بحرانی است، بسته به پارامترهای زیادی است که می‌تواند شامل مقدار فولاد خمشی و برشی، هندسه و خواص مصالح ورق تقویتی، مشخصات چسب و تیر بتن آرمه باشد. در ادامه‌ی این فصل هر یک از مودهای گسیختگی با جزییات بیش‌تری تشریح خواهد شد

۲-۲-۱ گسیختگی خمشی

چنان‌چه ورق تقویتی به صورت مناسب مهار شود، ظرفیت نهایی خمشی تیر می‌تواند با پارگی ورق FRP (شکل۲-۲-a) و یا خرد شدگی بتن در ناحیه‌ی فشاری (شکل۲-۲-b) همراه شود. این حالت گسیختگی شباهت زیادی به زوال خمشی کلاسیک تیرهای بتن آرمه دارد. عموما پارگی ورق FRP در پی تسلیم آرماتور کششی حادث می‌شود، مگر آن که آرماتور کششی در فاصله‌ی نسبتا زیادی از وجه کششی تیر قرار داده شود. استفاده از ورق های FRP در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش انعطاف پذیری تیر می‌شود. مساله‌ی افزایش مقاومت و کاهش انعطاف پذیری، دو ویژگی اصلی تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با استفاده از ورقه‌های FRP است که در بسیاری از مراجع به آن‌ها اشاره شده است . کاهش انعطاف پذیری در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق که با خرد شدگی ناحیه‌ی فشاری گسیخته می‌شوند، نیز مشاهده می‌شود [۳۴]. در این حالت معمولا از مقادیر زیادی ورقه‌های FRP به عنوان تقویت خمشی تیر استفاده شده است.

۲-۲-۲ گسیختگی برشی

تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های FRP می‌تواند در برش به صورت ترد، مطابق شکل ۲-۲-c، گسیخته شود. تیرهای بتن آرمه تقویت نشده که بر اساس خمش طراحی شده‌اند و در طراحی آن‌ها از ایجاد گسیختگی برشی اجتناب شده است، چنان‌چه تحت تقویت خمشی با ورقه‌های FRP قرار گیرند، ممکن است به صورت بحرانی، گسیختگی برشی از نوع نشان داده شده در شکل ۲-۲-c را تجربه نمایند. از آن جا که ورق FRP سهم ناچیزی در تحمل برش دارد، بنابر این ظرفیت برشی تیر عمدتا توسط تیر بتن‌آرمه تامین می‌شود. در این موارد به منظور حصول اطمینان از وقوع گسیختگی خمشی، تقویت برشی باید همزمان با تقویت خمشی تیر بتن آرمه انجام شود.

قابل ذکر است که برخلاف ترد بودن گسیختگی خمشی در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های FRP ، این گونه تیرها انعطاف پذیری بسیار بیش‌تری را نسبت به تیرهای مشابه که با گسیختگی برشی زوال می یابند، از خود نشان می‌دهند [۳۲].

۲-۲-۳ گسیختگی جدا شدگی

در تیرهای بتن آرمه تقویت شده با ورقه‌های FRP، به دلیل جدا شدن ناگهانی ورق، ممکن است گسیختگی‌های زودرس[1]، قبل از آن که ظرفیت خمشی نهایی تیر استحصال شود، ایجاد گردد. حالات شایع این جدا شدگی‌ها در شکل ۲-۲-d تا ۲-۲-g نشان داده شده است. از بین این حالات گسیختگی، جدا شدن پوشش بتن بیش‌تر از انواع دیگر در مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف به آن اشاره شده است (شکل ۲-۲-d). این حالت گسیختگی

[1] Premature Failure

مشابه با حالت گسیختگی شکل ۲-۲-e، که فقط لایه‌ی نازکی از بتن به سطح ورق FRP در هنگام جدا شدگی متصل است، از یک انتها یا در نزدیکی یک انتهای ورق شروع و به سمت وسط تیر پیش‌روی می‌کند. حالت دوم جدا شدگی کم‌تر از حالت اول در گزارشات منتشر شده به آن اشاره شده است. در حالاتی نیز این دو مود گسیختگی با هم مشاهده شده است [۳۵]. در ادامه‌ی این قسمت، انواع حالات گسیختگی جدا شدگی با جزییات بیش‌تر آورده شده است.

الف-گسیختگی جدا شدن پوشش بتن[1]

جدا شدن ورق FRP به همراه پوشش روی آرماتور یکی از شایع‌ترین حالات گسیختگی زودرس است که در تحقیقات بسیاری به آن اشاره شده است [۳۶-۳۹]. این حالت گسیختگی از یک انتها یا در نزدیکی یک انتهای ورق شروع و به سمت وسط تیر پیش‌روی می‌کند. این حالت گسیختگی با عناوین مختلف و متنوعی[2] در تحقیقات محققین از آن نام برده شده است. از آن جا که گسیختگی در این حالت در ناحیه‌ی دورتری از سطح ورق حاصل می‌شود، عنوان گسیختگی جدا شدگی[3]، یک عنوان دقیق برای آن نیست و در حقیقت وقوع این نوع گسیختگی ناشی از وجود تمرکز تنش در نزدیکی انتهای ورق است که در قسمت‌های بعدی به تفصیل در مورد آن مطالبی عنوان خواهد شد. با توجه به طبیعت این نوع گسیختگی به نظر می‌رسد عنوان جدا شدن پوشش بتن که توسط گاردن و هلاوی [۴۰] و جووانداس و همکاران [۴۱] در سال ۱۹۹۸ پیشنهاد شد، این حالت گسیختگی را بهتر و دقیق‌تر بیان نماید.

در حالت کلی باور و اعتقاد بیش‌تر محققین بر این است که گسیختگی پوشش بتن با ایجاد یک ترک در بتن در انتها و یا در نزدیکی انتهای ورق، به دلیل شدت زیاد تنش‌های بین سطحی قائم و برشی، در اثر قطع ناگهانی ورق اتفاق می‌افتد [۴۱-۴۳]. زمانی که این ترک در انتها و یا در نزدیکی انتهای ورق شکل گرفت، ترک به سطح فولادهای کششی انتشار یافته و سپس به صورت افقی به موازات آرماتورهای کششی گسترش می‌یابد، که حاصل آن جدا شدن پوشش بتن به همراه ورق FRP از روی سطح بتن است.

مطابق با تحقیقات اسمیت وتنگ [۳۲] بر روی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق FRP و تحت لنگر خمشی سه نقطه‌ای، با نزدیک شدن انتهای ورق FRP به ناحیه‌ی تکیه‌گاه، ترک در انتهای ورق به حالت مایل تمایل پیدا می‌کند و روند گسیختگی نیز تردتر می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که نیروی برشی نسبت به لنگر خمشی در ایجاد گسیختگی در انتهای ورق نقش مهم‌تری دارد.

ب-گسیختگی جدا شدگی بین سطحی انتهای ورق

جدا شدگی بین چسب و تیر (شکل۲-۲-e) که از انتهای ورق شروع می‌شود، در تحقیقات تجربی محققین مشاهده شده است [۴۴-۴۶]. در این حالت رفتار بار- تغییر مکان مشابه گسیختگی جدا شدن پوشش بتن است.

---

[1] Concrete Cover Separation Failure

[2] End-of Plate Failure through Concrete، Concrete Rip-off Failure، Debond at Rebar Layer، Local Shear Failure and Concrete Cover Delamination

[3] Debonding Failure

دیدگاه مشترک محققین در این نوع گسیختگی آن است که در نتیجه‌ی اعمال بار، تنش‌های بین سطحی از نوع برشی و قائم، در انتهای ورق ایجاد می‌شود. حال چنان‌چه مقادیر این تنش‌ها از مقاومت عضو ضعیف‌تر در ناحیه‌ی اتصال (یعنی بتن)، تجاوز کند، این نوع گسیختگی به وقوع می‌پیوندد [۲۸ و۴۶]. بیش‌تر اوقات در این نوع گسیختگی، لایه‌ی نازکی از بتن به سطح ورق متصل است (حالت e). این مطلب نشان می‌دهد که گسیختگی در بتن، در مجاورت سطح در تماس بتن- چسب حادث می‌شود.

ج- جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی

جدا شدگی ممکن است در یک ترک خمشی یا در یک ترک ترکیبی خمشی-برشی در ناحیه‌ی دور از انتهای ورق شروع شده و سپس به سمت یکی از دو انتهای ورق انتشار یابد (شکل ۲-۲-f و g). جدا شدگی عموما در بتن در مجاورت سطح چسب به بتن حادث می‌شود. در این حالت نیز مقداری از بتن به سطح ورق چسبیده است و بنابر این مطابق حالت گسیختگی جدا شدگی در انتهای ورق، چنین برمی‌آید که گسیختگی در بتن و در مجاورت سطح چسب به بتن ایجاد می‌شود. با استفاده از مهارU شکل در ناحیه‌ی میانی تیر در یک سمت، می‌توان انتشار جدا شدگی را به انتهای دیگر ورق سوق داد [۳۲].

ج-۱ جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی خمشی

مکانیزم این نوع جدا شدگی (شکل ۲-۲-f) را می‌توان به این صورت خلاصه کرد که وقتی که یک ترک غالب در بتن و در محل حداکثر لنگر خمشی ایجاد می شود، تنش‌های کششی آزاد شده، به وسیله‌ی بتن ترک خورده، به ورق FRP منتقل می‌شود. در نتیجه‌ی این انتقال تنش، تنش‌های موضعی بین سطحی بزرگی در بین سطح ورق FRP و بتن در نزدیک ترک القا می‌شود. به محض افزایش بارگذاری، تنش‌های کششی در ورق و متعاقب آن، تنش‌های بین سطحی بین ورق FRP و بتن در نزدیک محل ترک افزایش می‌یابد. چنان‌چه این تنش‌ها به مقدار بحرانی خود برسد، جداشدگی از ترک شروع و سپس به طرف انتهای ورق، عموما انتهای نزدیک‌تر، انتشار می‌یابد [۳۲].

ج-۲ جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک خمشی- برشی

برای جدا شدگی ناشی از ترک خمشی، عریض شدن ترک یک نیروی محرک برای انتشار ترک است، در حالی که برای یک گسیختگی جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک خمشی- برشی، تغییر مکان قائم نسبی بین دو وجه ترک، باعث ایجاد تنش‌های پوسته شدگی روی ورق FRP و عمود بر سطح بتن می‌شود (شکل ۲-۲-g).

در این رابطه برخی محققین معتقدند که در وحله اول عریض شدن ترک مهم‌ترین عامل ایجاد و انتشار جدا شدگی بوده و جابه‌جایی نسبی سطوح مجاور ترک، عامل ثانویه است [۳۲].

۲-۳ بررسی مطالعات تجربی

رفتار تیرهای بتن‌آرمه که به صورت خارجی با ورقه‌های فلزی یا صفحات FRP تقویت شده‌اند، توسط بسیاری از محققین در چند دهه‌ی گذشته به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات بهبود قابل ملاحظه‌ای را در افزایش ظرفیت باربری تیر نشان می‌دهد. بر خلاف طبیعت و رفتار مختلف ورقه‌های فلزی و ورقه‌هایFRP، عملکرد تیر در مقابله با نیروهای اعمالی در هر دو مورد شباهت‌های بسیاری را از خود نشان داده است. به همین دلیل محققین در بسیاری از موارد با کمک نتایج حاصل از تقویت تیر به وسیله‌ی ورقه‌های فلزی و با انجام اصلاحاتی به تفسیر، شبیه سازی و مدل سازی رفتار تیرهای تقویت شده با ورقه‌هایFRP پرداخته‌اند.

در این قسمت ابتدا بر سابقه‌ی تحقیق در مورد رفتار جدا شدگی تیرهای بتن‌آرمه با استفاده از ورقه‌های فلزی اشاره خواهد شد و در ادامه، تاریخچه‌ی موضوع در مورد استفاده از ورقه‌هایFRP مرور خواهد گردید.

۲-۳-۱ رفتار جدا شدگی تیرهای بتن‌آرمه با استفاده از اتصال ورقه‌های فولادی

سابقه‌ی استفاده‌ی میدانی از روش تقویت تیرهای بتن‌آرمه با کمک ورقه‌های فولادی، به دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی برمی‌گردد. اولین گزارش منتشر شده در این زمینه مربوط به اتصال ورق فولادی با چسب به تیرهای یک ساختمان در آفریقای جنوبی در سال ۱۹۶۴ است [۴۷]. هم‌چنین تقویت تعدادی پل در انگلستان درسال‌های ۱۹۷۵ و۱۹۷۷ و تقویت ساختمان‌هایی در سوئیس [۴۷ و ۴۸]، از اولین استفاده‌های این روش در تقویت ساختمان‌ها حکایت می‌کند.

رفتار تیرهای بتنی که به صورت خارجی با ورقه‌های فولادی متصل به وجه کششی تیر مسلح شده‌اند، نیز توسط برخی از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۹ و ۵۰]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که رفتار کاملا مرکب[1] عضو به وسیله‌ی چسب امکان پذیر بوده و بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد عضو به لحاظ ظرفیت باربری، کنترل ترک و سختی به وجود می‌آید.

اثرات ورق تقویتی فولادی بر روی رفتار ترک خوردگی، نحوه‌ی تغییر شکل و مقاومت نهایی تیرهای بتن آرمه، توسط سوآمی و همکاران [۵۱] مطالعه گردید. نتایج این تحقیقات نشان داد که استفاده از ورق فلزی باعث افزایش سختی خمشی و کاهش تغییر شکل تیر می‌شود. در تحقیقات مشابه، در موارد متعددی به جدا شدن نا به هنگام ورق از سطح بتن نیز اشاره شده است [۵۲-۵۴].

۲-۳-۲ رفتار جدا شدگی تیرهای بتن‌آرمه با استفاده از اتصال ورقه‌های FRP

در سال ۱۹۹۱ سعادت منش و احسانی [۵۵]، تعداد ۴ تیر بتن‌آرمه با مقطع مستطیلی و یک تیر بتن‌آرمه با مقطع T شکل را با اتصال ورقه‌ی FRP به ناحیه‌ی کششی تیر به صورت خمشی تقویت کرده و اثرات این نحوه‌ی تقویت را مورد آزمایش قرار دادند. در این آزمایشات تاثیر میزان آرماتورهای خمشی و برشی و هم‌چنین اثرات پیش تنیدگی تیر و نوع چسب مورد استفاده بر مقاومت تیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایشات، افزایش قابل توجه مقاومت خمشی را در مقایسه با نمونه‌های تقویت نشده نشان داد. هم‌چنین مقدار افزایش مقاومت خمشی در تیرهای با نسبت کم‌تر فولادهای طولی، بیش‌تر مشاهده شد. علاوه بر آن نشان داده شد که استفاده از ورق FRP باعث کاهش

[1] Full Composite Action

اندازه‌ی ترک در کلیه‌ی سطوح بارگذاری و تا حدی کاهش انعطاف پذیری می‌گردد. در این تحقیق در برخی از نمونه‌ها، به مساله‌ی جدا شدگی زودرس ورق FRP از سطح بتن در قبل از بار نهایی محاسباتی، اشاره شده است. در این نمونه‌ها روند انجام جدا شدگی به صورت ناگهانی و به صورت ترد گزارش شده است.

در سال ۱۹۹۱، ری‌تچی و همکاران [۳۷]، ۱۶ تیر بتن مسلح با مقاطعی به ابعاد ۱۵۲×۳۰۵ میلی‌متر را به وسیله‌ی ورق‌های FRP تقویت کردند و میزان تاثیر ورق FRP را در ظرفیت خمشی تیرها بررسی کردند. تیرهای مورد آزمایش از لحاظ جنس ورق، زاویه‌ی الیاف و مقاومت بتن با یکدیگر متفاوت بودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از ورق FRP یک راه حل بسیار خوب برای بهبود مقاومت و سختی تیرهای بتن مسلح است.

شریف و همکاران در سال ۱۹۹۴ [۳۶]، در یک تحقیق آزمایشگاهی تعداد ۱۰ نمونه تیر بتنی به ابعاد کوچک (۱۲۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی متر)، با نسبت فولاد طولی ۰/۰۰۹۸ ، (کم‌تر از حد معمول)، و با آرماتور عرضی بیش‌تر از حد آیین نامه‌ای (بیش از دو برابر) را تحت آزمایش قرار دادند. برای تقویت تیرها از ورقه‌های الیاف شیشه‌ی بافته شده به ضخامت ۱، ۲ و ۳ میلی مترکه با چسب پلی استر اشباع شده بودند، استفاده شد. این تیرها تحت بار ۴ نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. در این تحقیق به منظور شبیه سازی تقویت در مورد تیرهای صدمه دیده، ابتدا ۸ تیر مورد آزمایش، تحت بار خمشی قرار گرفتند، به نحوی که حداکثر تغییر مکان وسط تیرها به ۱۵ میلی‌متر رسید. این تغییر مکان معادل اعمال ۸۵٪ از ظرفیت بار پذیری تیر است. در این حالت تغییر مکان دائمی تیر در حد ۴/۵ تا ۵/۴ میلی متر، آرماتورهای خمشی تسلیم و کرنش پلاستیک دائم تیر در حالت برداشت کامل بار ۵۶۹×۱۰^{-۶} گزارش شده است. هم‌چنین ترک‌های خمشی وسط دهانه ۷۵٪ عمق دهانه پیشروی و عرض ترک در حالت بارگذاری ۱/۵ میلی متر و پس از باربرداری ۰/۷ میلی مترعنوان شده است. پس از برداشت کامل بار، کلیه تیرها با ورقه‌های FRP به ضخامت های مختلف تقویت شدند. هم‌چنین برای توسعه‌ی مقاومت و انعطاف پذیری بیش‌تر، از تکنیک‌های مختلف مهاری استفاده شد. روش مهاری‌های انتخاب شده در این تحقیق شامل استفاده از بولت در انتهای ورقِ متصل به وجه کششی تیر، استفاده از اتصال ورقه‌های اضافی FRP به ناحیه‌ی دهانه‌ی برشی در طرفین جانبی تیر و هم‌چنین استفاده از ورق FRP خاص به صورت I شکل در ناحیه‌ی کششی و وجوه جانبی تیر در ناحیه‌ی دهانه‌ی برشی بود. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که تنش‌های قائم و برشی ایجاد شده در محل قطع ورق FRP با افزایش ضخامت ورق، افزوده شده و در نهایت به پدیده‌ی جدا شدن ورق از سطح بتن منجر می‌شود. هم‌چنین استفاده از بولت در انتهای ورق‌های ضخیم از پدیده‌ی جدا شدن ورق ممانعت کرده ولی تیر تقویت شده تحت حالت ترک‌های کششی قطری گسیخته می‌شود. در این تحقیق بهترین شیوه‌ی جلوگیری از پدیده‌ی جدا شدگی ورق و گسیختگی کششی قطری، استفاده از ورق FRP به صورت I شکل پیشنهاد شد. علاوه بر آن رفتار تیر، علیرغم تردی ورق‌های FRP ، به حد کافی انعطاف‌پذیر گزارش شده است.

نوریس و همکاران در سال ۱۹۹۷ [۵۶]، رفتار تیرهای صدمه دیده و تقویت نشده که با ورقه‌های CFRP تعمیر و بازسازی شده‌اند را مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تئوری قرار دادند. در این تحقیق برای بالا بردن مقاومت خمشی و برشی تیر بتن‌آرمه، صفحات تقویتیFRP به وجه کششی و وجوه جانبی تیر با سه سیستم مختلف و هم‌چنین با الیاف

در جهات مختلف متصل شد. نتایج آزمایشات افزایش در مقاومت و سختی را نسبت به نمونه‌های تقویت نشده نشان می‌دهد. مقدار این افزایش و حالت گسیختگی ایجاد شده، بسته به جهت الیاف مورد استفاده است. چنان‌چه راستای الیاف عمود بر ترک در نظر گرفته شود، مقدار افزایش مقاومت و سختی بیش‌تری در تیر نسبت به حالتی که راستای الیاف عمود بر ترک نباشد به دست می‌آید. در مقابل، الیاف مورب نسبت به امتداد طولی تیر، ظرفیت انعطاف پذیری بیش‌تری را در تیر ایجاد می‌نماید. این نتایج نشان می‌دهد که نحوه‌ی قرار گرفتن الیاف و آرایش آن می‌تواند در میزان افزایش مقاومت یا انعطاف پذیریِ تیر موثر باشد.

در سال ۱۹۹۸ جواندس و همکاران [۴۱]، دو دسته از تیرهای تقویت شده با کامپوزیت‌های کربن را به منظور بررسی توزیع تنش پیوستگی و اثرات آن بر روی تغییرات طول پیوستگی و هم‌چنین بررسی زوال تیر بر مقاومت آن، مورد بررسی قرار دادند. در دسته‌ی اول، آن‌ها اثر تغییرات طول پیوستگی، نحوه‌ی آماده سازی سطح بتن، سطح چسب و مهار انتهایی بر توزیع تنش پیوستگی را بررسی کردند. مطابق نتایج به دست آمده، در این روش تقویت، مهم‌ترین عامل موثر بر تقویت عضو، پیوستگی بین لایه‌های تقویتی و سطح بتن عنوان گردید. در این رابطه آماده سازی سطح بتن شامل خراشیدن، پاک کردن و سندبلاست کردن سطح بتن و استفاده از یک ماده‌ی پرایمر به منظور حذف یا کم کردن پتانسیل پوسته شدگی لایه‌های تقویت مورد تاکید قرار گرفت. در این آزمایشات تاثیر مهار کردن انتهای ورق به صورت تطویل ورق تقویتی تا روی تکیه‌گاه و بعد از آن، به دلیل جلوگیری از جدا شدگی ورق، در افزایش ظرفیت باربری نهایی تیر مثبت ارزیابی گردید. لازم به ذکر است که این روش مهاری به دلیل عدم امکان دسترسی به زیر ناحیه‌ی تکیه‌گاه‌ها، به صورت عملی امکان پذیر نیست. در سری دوم نیز افزایش مقاومت تیرهای بتنی که درجه‌ی معینی از زوال را تجربه کرده بودند، مورد آزمایش قرار گرفت. درجه‌ی زوال تیرهای مورد آزمایش، معادل قرار گرفتنِ بتن با کیفیت پایین، در معرض شرایط آب و هوای طبیعی به مدت ۱۵ سال قید شده است. در این مرحله نیز کیفیت پایینِ بتن، عامل کاهش تاثیر مقاومت پیوستگی در سطح مشترک بتن و ورقه‌ی تقویتی ذکر شده است.

دیوید و همکاران در سال ۱۹۹۸ [۵۷]، ده تیر بتن آرمه به ابعاد ۲۸۰۰×۳۰۰×۱۵۰ میلی متر را که با سه نوع مختلف مصالح کامپوزیتی تقویت شده بودند، مورد آزمایش قرار دادند. در سه نمونه از این تیرها ابتدا در حد بار نهائی تیرهای بدون تقویت، بارگذاری انجام گردید. عرض ترک‌های ایجاد شده در تیر پس از بارگذاری اولیه به طور متوسط حدود ۰/۵ میلی‌متر گزارش شده است. پس از باربرداری، تیرها با استفاده از ورق کامپوزیتی با الیاف شیشه، به ضخامت ۳ و٦ میلی متر تقویت شد و سپس بارگذاری مجدد تا حد گسیختگی نهائی بر روی آن‌ها انجام گردید. در مرحله‌ی اول بارگذاری در تیر بدون تقویت، تغییر مکان وسط تیر حدود ۱۰ میلی متر و تیرها با ترک‌های خمشی بسیار گزارش شده‌اند. میزان تغییر شکل وسط تیر در حالت پس از تقویت در تیر با ورق کامپوزیتی ۳ میلی‌متری، حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر، و در تیر با ورق ٦ میلی‌متری، ۵۰ میلی‌متر عنوان شده است. در این تحقیق میزان افزایش بار در تیر با ورق تقویتی ۳ میلی‌متری نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۰٪، و در تیر با ورق تقویت ٦ میلی‌متری ۳۵٪ گزارش شده است. این نتایج نشان داد که افزایش ظرفیت نهائی تیر وابسته به ضخامت ورق تقویتی است. مودهای گسیختگی تیر نیز در حالت تقویت کم‌تر، پارگی ورق به دلیل باز شدگی ترک در وسط دهانه؛ و در مورد تقویت

بیش‌تر، جدا شدگی موضعی ورق تقویتی و گسیختگی برشی لایه‌ی بتنی، بین آرماتور و ورق تقویت خارجی ذکر شده است.

رُس و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۵۸]، با انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی ۲۴ تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های CFRP، ارتباط بین افزایش مقاومت و حالات مختلف گسیختگیِ مشاهده شده را بر حسب نسبت سطح مقطع ورق کامپوزیت به سطح مقطع میلگرد کششی، بررسی کردند. در این آزمایشات سطح مقطع ورق تقویتی ثابت و میزان فولاد کششی استفاده شده در تیر در ۶ حالت، بین $\rho_{\min}$ و $\rho_{\max}$، انتخاب گردید. نتایج آزمایشات انجام شده، دو حالت گسیختگی را نشان داد. برای مقادیر زیاد آرماتور کششی استفاده شده، حالت گسیختگی، با خرد شدن بتنِ ناحیه‌ی فشاری و ایجاد ترک‌های افقی در منطقه‌ی کششی تیر و در مجاورت فولادهای کششی توصیف شده است. در مقابل، در تیرهای تقویت شده با آرماتور کششی حداقل تا متوسط، (که نسبت سطح مقطع تسلیح خارجی به تسلیح داخلی زیاد است)، اثرات تقویت بسیار واضح و گسیختگی با جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن در ناحیه‌ی انتهای ورق گزارش شده است. در این دسته از تیرها، تغییر شکل‌های نسبتا بزرگی قبل از گسیختگی مشاهده شده است.

بن کاردینو و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۵۹]، دو سری از تیرهای بتن‌آرمه را با استفاده از ورقه‌های الیاف کربن دو جهته[1] به صورت خمشی و برشی تقویت کردند. آزمایشات مختلف نشان می‌دهد که اتصال ورقه‌های FRP به وجه کششی تیرها در تقویت خمشی، به تنهایی و بدون مهار کردن مناسب، نمی‌تواند از جدا شدگی نابهنگام ورق از سطح بتن جلوگیری کند. در این تحقیق، وجود سیستم مهار مناسب برای غلبه بر لغزش مهاری و جدا شدن ورق در انتها، کنترل لغزش ورق در طول دهانه در مقاطع بحرانیِ ترک خورده و افزایش مشارکت ناحیه‌ی فشاری به مقاومت و انعطاف پذیری با استفاده از محصور سازی این ناحیه از بتن، مورد تاکید قرار گرفته است. در این ارتباط ورقه‌های CFRP تک جهته، به دلیل عدم توانایی به متابعت از شکل و هندسه‌ی اعضای بتنی در گوشه‌ها و کنج‌ها و عدم کارآیی لازم مورد انتقاد قرار گرفته است. در این تحقیق برای غلبه بر این مشکل، از صفحات الیاف کربن دو جهته برای تقویت خمشی و برشی استفاده شده است. در این صفحات، ۷۰٪ الیاف در راستای تار و ۳۰٪ الیاف در راستای پود قرار دارد. در این آزمایشات، الیاف کربن دو جهته به شکل U به وجه کششی و یک سوم ارتفاع وجوه جانبی تیر (با و بدون مهار انتهایی) متصل گردید. برای مهار انتهایی نیز، در برخی موارد، از مهار U شکل با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به امتداد طولی تیر و با عرض ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. نتایج این آزمایشات نشان داد که استفاده از الیاف کربن دو جهته، حتی بدون هر گونه مهار انتهایی، عملکرد بهتری نسبت به الیاف تک جهته در تقویت‌های خمشی و برشی دارد؛ به گونه‌ای که مقاومت تئوری خمشیِ کامل، در این حالت نیز قابل حصول است.

در سال ۲۰۰۳ شین و لی [۶۰]، اثرات بارهای موجود را بر رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با صفحات کامپوزیت کربنی بررسی کردند. در این تحقیق تعداد ۸ تیر بتن آرمه با دو نسبت مختلف تسلیح و با سطوح بارهایِ موجودِ مختلف در لحظه‌ی تقویت مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایشات به منظور بررسی وضعیت ترک خوردگی و حالت گسیختگی تیر انجام شد. نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که عمدتا ترک‌های قبل از زمان

[1] Bidirectional carbon fiber fabric

تقویت، در تیرهای تقویت شده قادر به رشد بوده و معمولا ترک‌های جدیدتر، به صورت کامل در ارتفاع مقطع تیر، توسعه پیدا نمی‌کنند. هم‌چنین در این آزمایشات، تاثیر سطوح بارهای موجود در لحظه‌ی تقویت بر میزان تغییر شکل تیر در زمان تسلیم و در لحظه‌ی نهائی بسیار بیش‌تر از مقاومت نهائی تیر عنوان شده است.

رابینویچ و فراستیگ در سال ۲۰۰۳ [٦١]، ۵ تیر بتن آرمه را با ورقه‌های کامپوزیتی، در وجه کششی تقویت نموده و مورد آزمایش قرار دادند. تاکید این تحقیق بر تمرکز تنش در انتهای ورق FRP، اثرات انتهای ورق در مود گسیختگی ترد و ناگهانی تیر و بررسی حالاتی برای کاهش تنش‌های انتهایی و جلوگیری از گسیختگی جدا شدگی عنوان شده است. برای این منظور در تیرهای مختلف، از مهار انتهایی به صورت دورپیچ کامل در انتهای ورق با نوار اضافی کامپوزیتی، و هم‌چنین ایجاد ماهیچه در قسمت انتهای لایه‌ی چسب استفاده شده است. هم‌چنین در این تحقیق امکان بازسازی و تعمیر عضو بتن آرمه‌ی به شدت صدمه دیده، بر روی مود گسیختگی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی تاثیر تقویت در تیرهای بتن آرمه‌ی صدمه دیده، دو تیر بتن آرمه ابتدا در حالت بدون تقویت، تحت بار خمش ٤ نقطه‌ای قرار داده شده است. پس از حصول ظرفیت خمشی کامل در تیر و ایجاد تغییر شکلی معادل L/40 در وسط تیر، باربرداری از تیر انجام شد و سپس تیرها با یک لایه ورق FRP به ضخامت ۱/۳ میلی متر تقویت گردیده و مجددا تحت بارگذاری خمشی قرار داده شده است. لازم به ذکر است که تقویت تیر پس از باربرداری و در حالت وجود تغییر شکل پلاستیک باقیمانده در تیر، انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که امکان بازسازی موثر تیرهای به شدت صدمه دیده کاملا وجود دارد؛ به طوری که در حالت تقویت، ظرفیت خمشی اولیه‌ی تیر قابل استحصال بوده و حتی این ظرفیت به میزان قابل قبولی، می‌تواند افزایش یابد. هم‌چنین پس از تقویت، مود گسیختگی به صورت ناگهانی و ترد؛ و کاهش انعطاف پذیری زیادی در تیر مشاهده شده است. مقایسه‌ی پاسخ سازه‌ای تیرِ از ابتدا تقویت شده و تیر بارگذاری و تقویت شده نشان می‌دهد که ظرفیت بار قابل تحمل این دو نمونه چندان متفاوت نیست.

اُه و سیم در سال ۲۰۰۴ [۱۴]، با استفاده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی ۱۱ تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه، GFRP، اثرات طول، ضخامت و عرض ورق تقویتی را بر جدا شدگی بین سطحی بررسی کردند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش طول ورق تقویتی، نوع گسیختگی می‌تواند تغییر کند. به عبارت دیگر، در حالت استفاده از ورق تقویتی GFRP به طول ۰/۶L (L دهانه موثر تیر)، بدون توجه به نوع مهار استفاده شده، گسیختگی تیر با حالت جدا شدگی پوشش بتن از روی آرماتورهای کششی انجام می‌شود. در این تحقیق، روش مقتضی برای کنترل جدا شدگی پوشش بتن، استفاده از طول ورق تقویتی حداقل به میزان ۸۰٪ طول دهانه‌ی تیر پیشنهاد شده است؛ که در این صورت گسیختگی تیر از نوع جدا شدن بین سطحی خواهد بود. اُه و سیم، تاثیر پذیری نوع گسیختگی از تغییر در مقدار تقویت را به مراتب کم‌تر از تغییر در طول ورق ذکر کرده‌اند. در مورد عرض ورق تقویت نیز عنوان شده است که برای ورق‌های با ضخامت یکسان، افزایش عرض ورق منجر به افزایش باربری سازه می‌شود؛ ولی مقدار تغییر شکل تیر در بار حداکثر، تقریبا یکسان است. این محققان ضمن استفاده از مهار

U شکل و قلاب مهاری[1] در انتهای ورق FRP، نشان دادند که مهار U شکل مقاومت نهایی و انعطاف پذیری بهتری را ایجاد می‌نماید.

پیمانماس و پرن پانگساروج در سال ۲۰۰۴ [۶۲]، اثرات شرایط مختلف قیود انتهایی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های CFRP را در رفتار پوسته شدن[2] تیرهای تقویت شده بررسی کردند. در این تحقیق برای تقویت از ورق FRP و برای مهار کردن ورق از صفحات FRP به شکل U، L و X به دلیل انعطاف پذیری بیش‌تر در دورپیچ کردن تیر استفاده شد. هم‌چنین تاثیر پارامتر طول مهار ورق در پدیده‌ی جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن، مورد توجه قرار گرفت. در این تحقیق، طول مهار ورق به صورت نسبت طول ناحیه‌ی تقویت نشده تا مرکز تکیه گاه به طول دهانه‌ی برشی تعریف شده است.

نتایج این آزمایشات نشان داد که هر دو پارامتر طول مهاری و شرایط قیود انتهایی در مساله‌ی جدا شدگی ورق FRP موثر است. استفاده از دورپیچ قائم صفحات FRP در انتهای ورق تقویتیِ وجه کششی تیر یا تطویل ورق FRP در وجه کششی تیر تا نزدیک تکیه گاه، از جدا شدن انتهای ورق جلوگیری کرده ولی در عوض باعث جدا شدگی خمشی-برشی در طول تیر می‌شود. از آن جا که این حالت گسیختگی نیز به لحاظ عدم قابلیت پیش بینی بار جدا شدگی و هم‌چنین محل گسیختگی در عمل مشکل می‌باشد، لذا حالت گسیختگی فوق نیز نامطلوب تلقی شده است. در مقابل نشان داد که استفاده از مهار L یا X می‌تواند هم از جدا شدگی انتهایی و هم از جدا شدگی خمشی-برشی ممانعت نماید. مود گسیختگی تیر در این حالت، خرد شدگی در ناحیه فشاری بتن اعلام شده است. از آن جا که ظرفیت خمشی تیر در این حالت قابل پیش بینی است، لذا حالت گسیختگی فوق، مطلوب تلقی گردید. نتایج تحلیلی موضوع در خصوص وضعیت تنش های قائم و میزان کرنش در لحظه گسیختگی نشان داد که اضافه کردن ورق FRP به تیر، تمایل به کاهش تنش طولی در میلگردها را افزایش می‌دهد و دورپیچ کردن لایه‌ی FRP به صورت L و X، می‌تواند باعث رسیدن تنش در میلگرد به حد تنش تسلیم و انعطاف پذیری بیش‌تر تیر شود.

برنا و ماکری در سال ۲۰۰۴ [۶۳]، با آزمایش بر روی ۱۸ تیر بتن‌آرمه با ابعاد کوچک (۹۱۴×۱۰۲×۱۰۲ میلی متر)، که با ورقه‌های کامپوزیت کربنی تقویت شده بودند، اثرات شکل، ضخامت، عرض و مساحت ورق تقویتی را بر رفتار کلی تیر بررسی کردند. آزمایشات نشان داد که با تغییر شکل ورق تقویتی، مقدار بار نهایی و تغییر شکل تیر نیز تغییر می‌نماید. هم‌چنین استفاده از ورقه‌های کامپوزیت با عرض بیش‌تر، تغییر شکل تیر را تا ۶۰٪ نسبت به ورقه‌های کامپوزیت با عرض کم‌تر، افزایش می‌دهد. در این آزمایشات، اضافه کردن تعداد لایه‌های با عرض یکسان باعث افزایش بار تسلیم و بار نهایی تیر شد؛ ولی در عوض مقدار تغییر شکل نهایی تیر را کاهش داد. افزایش سطح مقطع ورق تقویتی، مقدار تغییر شکل تیر در حالت تسلیم را تغییر نداد. هم‌چنین در این تحقیق، اثرات ترک خوردگی بر توزیع کرنش کامپوزیت در سطوح مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که ایجاد ترک باعث ایجاد تغییرات زیاد در پروفیل کرنش در طول تیر می‌شود. بر این اساس چنین نتیجه گرفته شدکه اندازه گیری کرنش موضعی نمی‌تواند یک تفسیر حقیقی از رفتار کلی تیر را ارائه دهد. در این رابطه برای تخمین ظرفیت

[1] Fiber anchor
[2] Peeling behavior