FRP مواد مرکب پلیمری

ترمیم و تقویت سازه های بتن مسلح بر پلیمرهای مسلح به الیاف FRP (مواد مرکب پلیمری) هزینه نوسازی مجدد سازه ها زیاد می باشد ، لذا در سال های اخیر مسئله تقویت و ترمیم سازه های ضعیف و خسارت دیده مطرح می باشد. جهت تقویت و ترمیم روشهای مختلفی وجود دارد که می توان به استفاده از پیش تنیدگی خارجی ، ژاکت فولادی یا بتنی یا صفحات پلیمری مرکب FRP شاره نمود.

از جمله دلایل ترمیم و تقویت میتوان به خطاهای طراحی ، خطاهای اجرایی ، تغییر در کاربری سازه ها ، خوردگی فولاد و تخریب بتن ، تغییر آیین نامه ها و آسیب دیدگی سازه ها در اثر بلایای طبیعی اشاره نمود. در ترمیم و تقویت اجزاء بتن مسلح باید پیوستگی بین بتن قدیمی و جدید ایجاد شود. بدین منظور می توان از زبرکردن سطوح بتنی قدیمی ، پوشاندن سطوح قدیمی با انواع رزین ها (مثلاً اپوکسی) ، جوش دادن آرماتورها و میل گردهای انتظار استفاده نمود.

برای مرمت ستون ها می توان از قفسهای فلزی (نبشی و بست های فولادی) استفاده نمود. اما مرمت اتصالات بین ستون ها و تیرها با این روش ممکن نیست. چسباندن ورقهای فلزی یا FRP روی بتن روش ساده ای است.

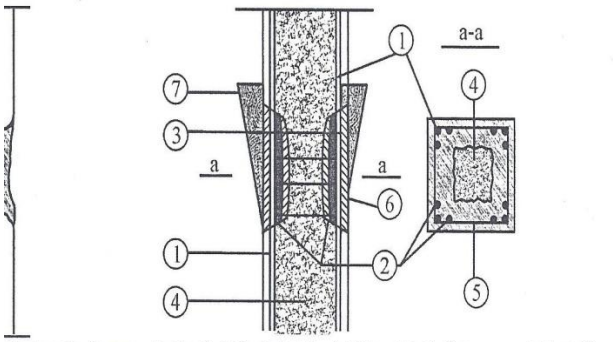
آسیب های ایجاد شده در ستون ها به شرح زیر می باشد:

۱- ترکهای ریز بدون خردشدن بتن یا گسیختگی آمارتورها.

۲- قلوه کن شدن سطحی بتن بدون آسیب دیدگی آمارتورها.

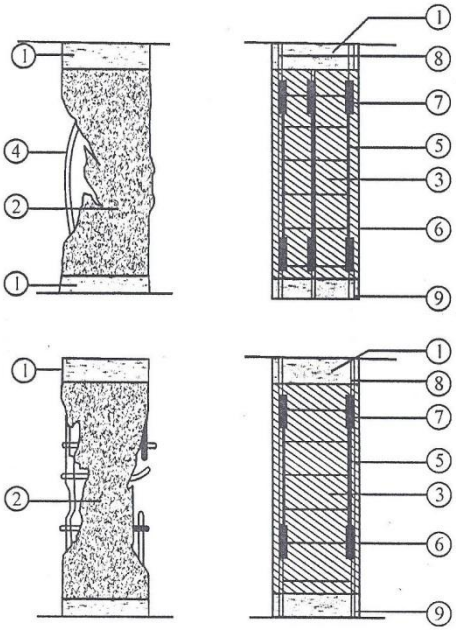
۲- خردشدگی بتن ، شکستن سنگ ها و کمانش آمارتورها.

بسته به میزان آسیب دیدگی ، راهکارهای مختلفی را می توان اعمال کرد. تزریق رزین ، برداشتن و جایگزین کردن قطعات و به کاربردن ژاکت از جمله این راه کارها هستند.



۱- آرماتورگذاری موجود ۲-آرماتورگذاری اضافه‌شده ۳-تنگهای اضافه‌شده ۴-بتن موجود ۵- بتن جدید ۶- موقت برای بتن‌ریزی.

شکل۱-ترمیم ستون هایی که به طور سطحی آسیب دیده اند.

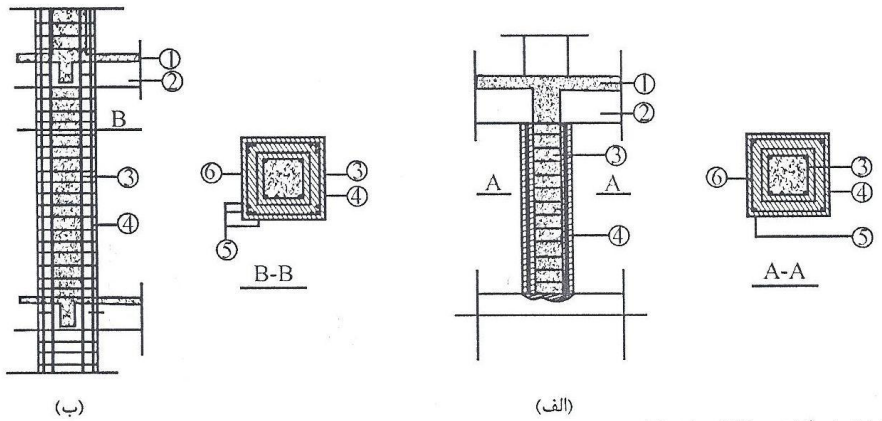


۱- بتن موجود و آسیب‌ندیده ۲- بتن موجود و آسیب‌دیده ۳- بتن جدید ۴- آرماتورهای کمانه‌کرده
۵- آرماتورگذاری اضافه‌شده ۶- تنگهای افزوده‌شده ۷- جوشکاری ۸- تنگهای موجود ۹- آرماتورگذاری موجود

شکل۲-ترمیم ستون با آسیب دیدگی شدید.

برای ستون هایی که به طور سطحی آسیب دیده اند می توان از تزریق بتن و ملاتهای رزینی استفاده نمود. اما برای ستونهای با آسیب دیدگی شدید باید از برداشتن و جایگزین کردن ستون استفاده شود . البته در این صورت باید یک سیستم تکیه گاهی موقت برای تحمل بارهای ستون ایجاد شود. در آسیب دیدگی شدید ستون باید بتن قدیمی کاملاً برداشته شود و پس از آمارتورگذاری طولی با جوشکاری مناسب و اتصال آن به آمارتورهای قدیمی و آمارتورگذاری عرضی نزدیک به هم ، بتن جدید ریخته شود و در صورت لزوم یک ژاکت بتنی اجرا شود. شکل۲ ترمیم یک ستون با آسیب دیدگی شدید را نشان می دهد.

ژاکتهای بتن آرمه ممکن است در یک یا چند ضلع یا دورتا دور ستون اجرا شوند و توصیه می شود که ژاکتها از سقف و دالهای کف نیز رد شوند تا علاوه بر افزایش مقاومت محوری و برشی ستون ، مقاومت خمشی نیز در اتصالات افزایش یابد.



(الف) اجرای ژاکت در ارتفاع یک طبقه

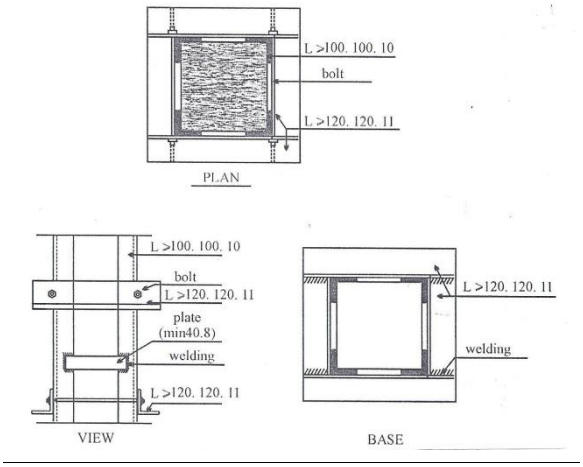
(ب) توسعه ژاکت به طبقات فوقانی و تحتانی

۱-دال ۲-تیر ۳-ستون موجود ۴-زره ۵-آرماتورگذاری طولی اضافه‌شده ۶-تنگهای افزوده‌شده.

شکل۳) ژاکتهای به کار رفته در تقویت ستون های بتنی

قفس های فولادی

جهت تقویت ستون های بتن آرمه می توان از قفس های ساخته شده از نیمرخ های فولادی استفاده نمود. قفس از چهار نبشی فولادی با حداقل ابعاد مقطع L50×50×5 تشکیل شده است. نبشی های مذکور با تسمه های فولادی با بُعد حداقل ۲۵×۴mm به یکدیگر متصل می شوند. قبل از جوشکاری ، نبشی های طولی به کمک نبشی های عرض و بولت روی گوشه ستون ها محکم نگه داشته می شوند. فضاهای خالی بین نبشی ها و سطح بتن با ملات یا گروت پر می شود. سپس سطح ستون از طریق بتن پاشی و یا بتن درجا و شبکه مفتولی پوشانده می شود. به دلیل ادامه نیافتن قفس در طبقات ، ظرفیت خمشی ستون در محل اتصال افزایش نمی یابد.



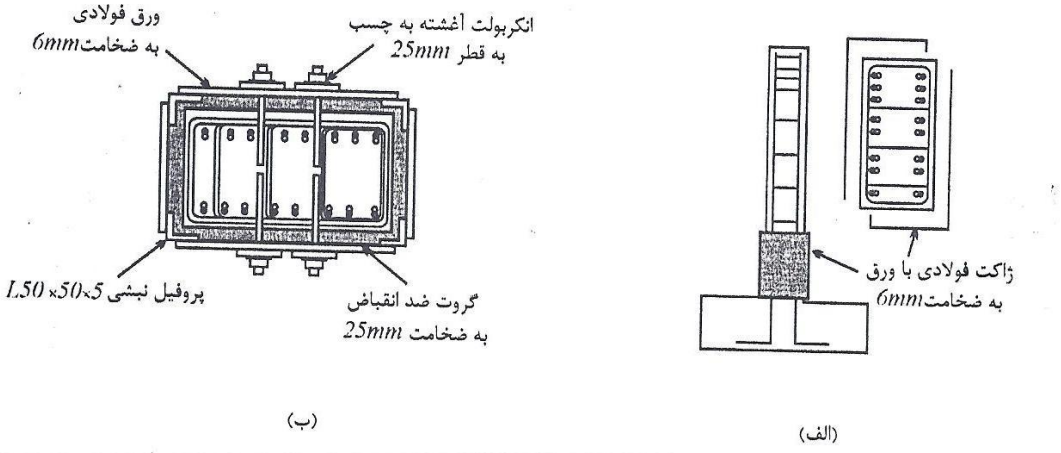
شکل ۴) تقویت ستون های بتنی با نیم حنای فولادی

ژاکتهای فولادی یا FRP

به صورت پوشش کاملی از ورقهای نازک فولادی یا الیاف پلیمری مرکب هستند که روی ستونهای موجود قرار می گیرند. ورقهای فولادی با ضخامت۶-۴ میلی متر در تمامی طول خود به هم جوش می شوند و با ستون فاصله کمی دارند. فضای بین ژاکت و ستون باگروت ضد انقباض پر می شود. مقاوم سازی با الیاف پلیمری از طریق پیماندن نوارهای پیوستهFRP آغشته به چسب رزین اپوکسی دور ستون یا با چسباندن ورقهای FRP روی سطح بتن انجام می شود.

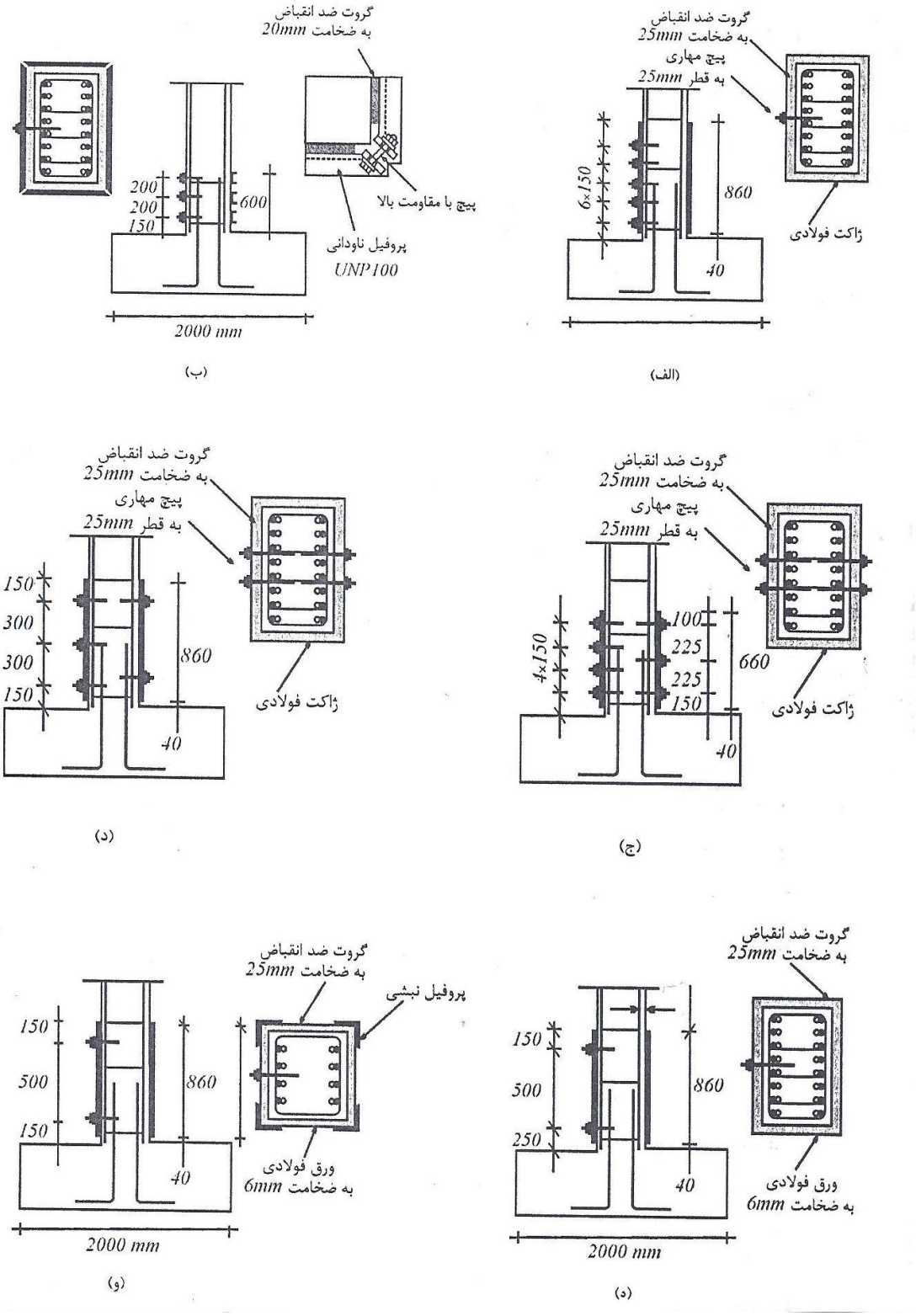
الف – نمای عمودی ستون های تقویت شده

ب- جزئیات ژاکت فولادی و پیچ های مهاری



شکل۵) جزئیات ستونی که توسط ژاکت فولادی و پیچ های مهاری آغشته به چسب تقویت شده اند.

ژاکتهای فولادی به صورت دو مقطع پیش ساخته L شکل به مقطع اصلی افزوده می شوند. فاصله ۲۵ میلیمتری بین ژاکت فولادی و مقطع بتنی باگروت پایه سیمانی ضذ انقباض پر می شود.



شکل۶) جزئیات ستون های تقویت شده با ژاکت های فولادی

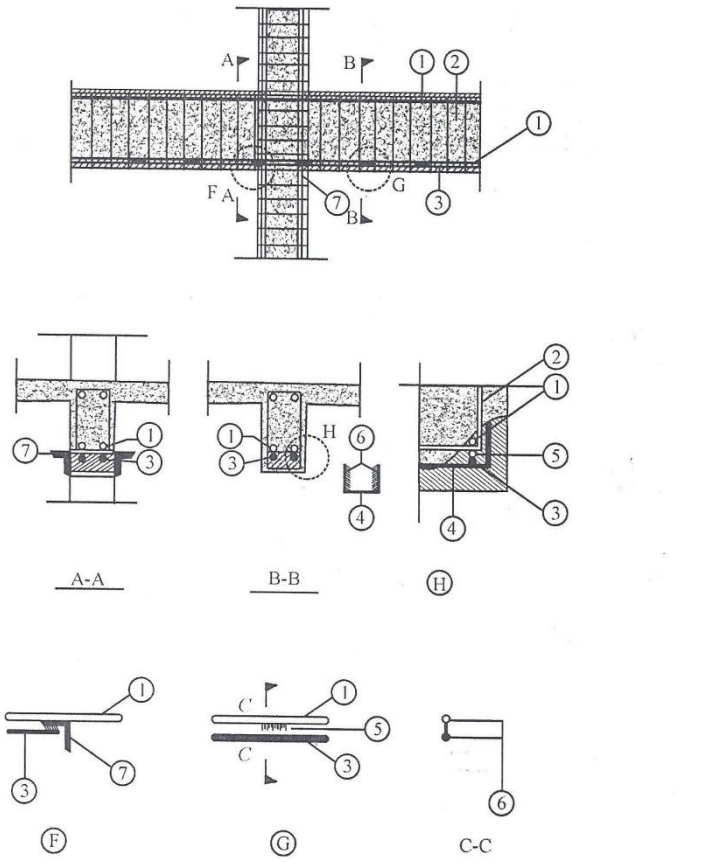
برای ترمیم و تقویت تیرها می توان از تزریق رزین ، چسباندن ورق های فولادی و یا الیاف پلیمری مرکب ، برداشتن و جایگزینی دوباره بتن و ژاکتهای بتنی استفاده نمود.

برای مرمت تیرهایی که ترکهای ریزی دارند تزریق رزین انجام می شود. اما تیرهایی که بتن آنها خرد شده و آرماتورهای آنها گسیخته شده باشد به روش برداشتن و جایگزینی مجدد بتن ترمیم می شوند.

ژاکتهای بتن آرمه به سه یا چهار وجه تیرها افزوده می شود. برای انتقال نیرو بین مصالح قدیمی و جدید ، زبر کردن سطح بتن قدیمی و جوش دادن میل گردهای اتصال به آرماتورهای جدید و قدیمی ضروری است.

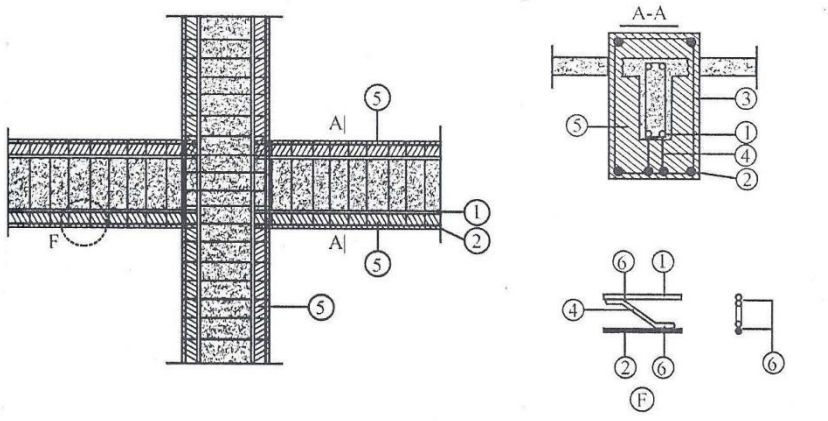
اجرای ژاکت بتنی در هر چهار وجه تیر موثرترین روش است. ضخامت بتنی که به وجه بالایی تیر افزوده می شود باید به اندازه ای باشد که در ضخامت سقف گم شود. اجرای تنگ ها از طریق سوراخ هایی که در فواصل نزدیک به هم در دال سقف ایجاد می شود امکان پذیر است.

اجرای ژاکت بتنی در سه وجه تیر برای افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیر در برابر بارهای قائم انجام می شود. اما به دلیل اینکه در این حالت افزایش باربری مقاطعی از تیر که در نزدیکی تکیه گاهها قرار دارند ، امکان پذیر نیست ، تیر را نمی توان در برابر بار زلزله تقویت کرد. به دلیل آنکه استفاده از قالب و ریختن بتن از بالای تیر امکان پذیر نیست ، تنها راه ممکن استفاده از بتن پاشی است.



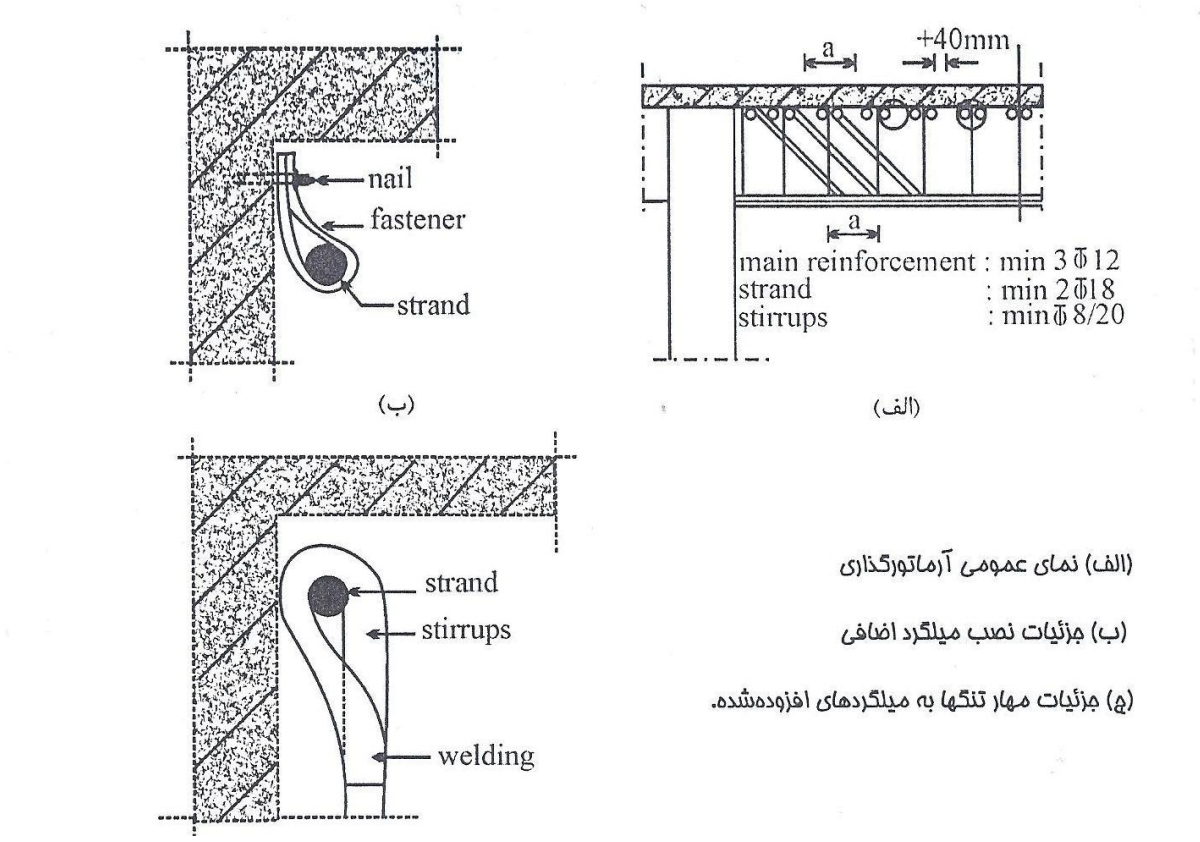
۱-آرماتورهای موجود ۲-خاموتهای موجود ۳-آرماتور طولی افزوده‌شده ۴-خاموتهای افزوده‌شده ۵- میلگردهای اتصال‌دهنده جوش‌شده ۶-جوشکاری ۷- نیمرخ نبشی.

شکل ۷) تقویت یک تیر در وجه تحتانی آن



۱- آرماتورهای موجود ۲- آرماتورهای طولی اضافه‌شده ۳-خاموتهای اضافه‌شده ۴-میلگردهای اتصال‌دهنده جوش‌شده ۵- ژاکت بتنی ۶-جوشکاری.

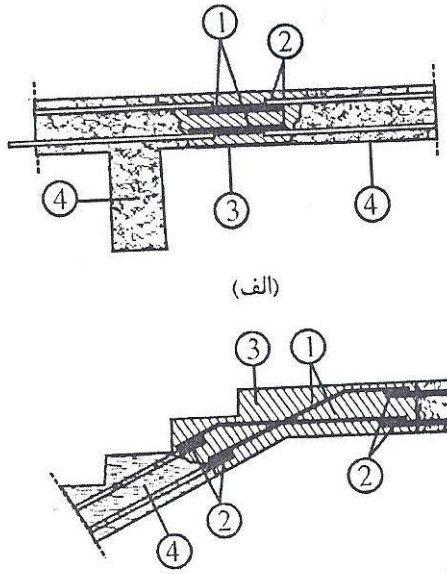
شکل ۸) اجرای ژاکت روی چهار وجه یک تیر



شکل ۹) اجرای ژاکت در سه طرف مقطع یک تیر

برای مقاوم سازی برشی تیرهای بتن آرمه می توان ورقهای فولادی را به سطح خارجی تیرها اتصال داد. این ورقهای فولادی را می توان به دو روش چسباندن با چسب اپوکسی و یا به کمک پیچ های مهاری به تیرهای بتنی متصل نمود.

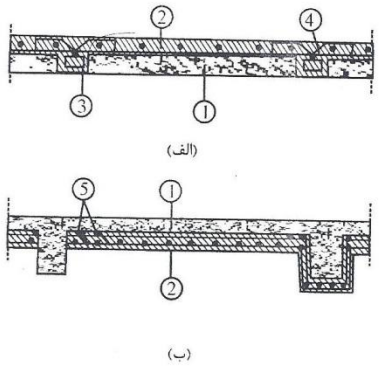
جهت تقویت خمشی تیرها می توان ورق های FRP را به وجه کششی تیر چسباند و برای افزایش ظرفیت برشی تیرها ورق را به وجوه قائم در نزدیکی تکیه گاهها چسباند. اگر تیر دارای ترک باشد قبل از اتصال ورق ها باید ترمیم با رزین اپوکسی انجام شود.



(الف) مرمت داخل دهانه (ب) مرمت محل اتصال پله به دال.
۱- آرماتورهای افزوده‌شده ۲- جوشکاری ۳-بتن جدید ۴-دال موجود.

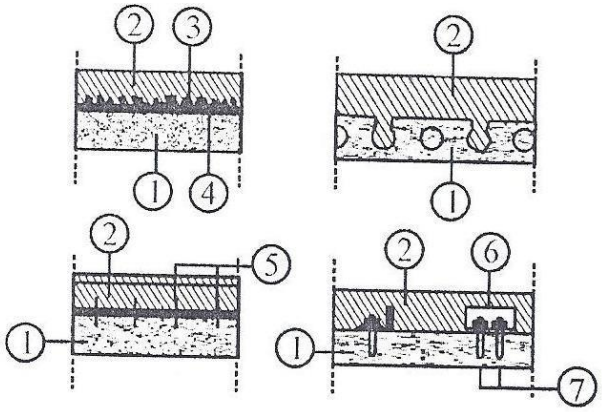
شکل ۱۰) مرمت موضعی در کل ضخامت یک دال

اگر مقاومت یک دال کافی نباشد می توان با افزایش ضخامت و ریختن بتن روی وجه فوقانی آن ، یا با افزایش ضخامت و قرار دادن آرماتور روی وجه تحتانی و سپس بتن پاشی وجه تحتانی آن را تقویت کرد. جهت انتقال نیرو بین بتن قدیم و بتن جدید ، زبر کردن سطوح قدیمی و آغشته کردن سطوح قدیمی به رزین و استفاده از میل گردهای مهاری انتظار انجام می شود.



(الف) افزایش ضخامت دال با ریختن بتن روی وجه فوقانی
(ب) افزایش ضخامت دال از طرف وجه تحتانی همراه با آرماتورگذاری جدید
۱- دال موجود ۲- آرماتورگذاری اضافه‌شده ۳- زائده اتصال‌دهنده ۴- میلگردهای مهاری خم‌شده
۵- میلگردهای اتصال‌دهنده جوش‌شده.

شکل ۱۱) افزایش ضخامت دال –افزودن آرماتورهای جدید



۱-دال، ۲-دال جدید ۳-شن شکسته ۴- چسب اپوکسی ۵-پیچ‌های آغشته به اپوکسی ۶-نیمرخ نبشی ۷- پیچ‌های مهاری

شکل ۱۲) جزئیات اتصال لایه جدید بتنی به بتن قدیمی در یک دال

مواد مرکب پلیمری:

انتخاب روش ترمیم و تقویت بسیار با اهمیت بوده و بستگی به شرایط کار و اهداف مورد نظر دارد. در شرایطی که محدودیت های زمانی و ابعاد هندسی مقاطع وجود دارد، استفاده از ورق های FRP جهت ترمیم و تقویت بهترین روش می باشد. وزن کم مصالح (حدود ۲۰ درصد وزن ورق های فولادی)، مقاومت کششی زیاد، مدول الاستیسته بالا، دوام و سهولت اجرایی نیز از مزایای ورقهای FRP می باشد.

با توسعه شیمی آلی در سال ۱۸۴۷ برزیلوس شیمیدان سوئدی اولین رزین ها را تهیه نمود. در سال ۱۹۳۰ دانشمندان به فکر استفاده از مواد تقویت کننده افتاده و مفهوم مواد مرکب پایه گذاری شد. در سال ۱۹۴۲ الیاف شیشه با پوشش رزین پلی استر ساخته شد و سپس انواع مختلف مواد مرکبی ارائه گردید.

در مواد مرکب پلیمری سه ناحیه متمایز وجود دارد: فاز پیوسته (ماتریس) ، فاز ناپیوسته (تقویت کننده) و لایه مرزی بین این دو فاز . ماتریس نقش توزیع بار بین الیاف و محافظت آنها در برابر عوامل محیطی را دارد. الیاف نقش اصلی در مقاومت و مشخصات مکانیکی ماده مرکب را دارد.

عوامل اصلی موثر در خواص فیزیکی کامپوزیت های FRP عبارتند از:

خواص مکانیکی الیاف – آرایش الیاف – طول الیاف – شکل الیاف – جنس الیاف – درصد ترکیب الیاف – خواص مکانیکی ماتریس پلیمری – چسبندگی و پیوند الیاف و ماتریس.

مهم ترین الیاف مورد استفاده عبارتند از:

الیاف شیشه GFRP – الیاف کربن CFRP – الیاف آرامید AFRP

الیاف شیشه – رایج ترین و پرمصرف ترین نوع الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت است.

مزایا: قیمت پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا، خواص عایقی بالا (حرارتی و الکتریکی)

نوع مواد	دانسیته نسبی	مدول یانگ، Gpa	استحکام کششی، Gpa	کرنش در شکست، ٪	قطر لیف، μm	قیمت، $/Kg
الیاف: الیاف شیشه نوع E	۳/۵۵	۷٤	۱/۵–۳	۱/۸–۳/۲	۱۰–۱٦	۲/۸
الیاف شیشه S	۳/۵	۸۷	۳/۵	٤/۰	۱۲	۱۱
الیاف شیشه نوع R	۳/٤۹	۸٦	٤/۰	۵/٤	۱۰	
کربن بر پایه قیر	۳/۳۰	۳۸۰	۲/۰–۲/٤	۰/۵	۱۰	
کربن PAN:						
استحکام بالا HS	۱/۸	۲۲۰–۲٤۰	۳/۰–۳/۳	۱/۳–۱/٤	۷	٤۸–۱۱۰
کارآیی بالا	۱/۸	۲۲۰–۲٤۰	۳/۳–۳/٦	۱/٤–۱/۵	۷	
کرنش بالا	۱/۸	۲۲۰–۲٤۰	۳/۷	۱/۵–۱/۷	۷	
آرامید:						
مدول بالا	۱/٤۷	۱۸۰	۲/٤۵	۱/۹	۱۲	٤۸–٦٦
مدول متوسط	۱/٤٦	۱۲۸	۲/٦۵	۲/٤	۱۲	
موادغیرلیفی (BOLK)						
آهن	۷/۸	۲۱۰	۰/۳٤–۲/۱	—	—	۰/۷
آلیاژهای آلومینیم	۲/۷	۷۰	۰/۱٤–۰/٦۲	—	—	۳–۲۰
رزین‌ها:						
فنلیک	۱/٤	۷	—	۰/۵	—	۸–٤۰
اپوکسی	۱/۲	۲–۳/۵	۰/۰۵–۰/۰۹	۱/۵–٦	—	
پلی‌استر	۱/٤	۲–۳	۰/۰٤ –۰/۰۸۵	۱–۲/۰	—	۲/٦

جدول۱– خواص مکانیکی مهم ترین الیاف تقویت کننده و تعدادی از مواد دیگر

معایب: مدول کششی پایین، وزن مخصوص نسبتاً بالا، حساسیت به سایش در حین حمل و نقل، مقاومت خستگی پایین، شکننده بودن، سختی بالا (سایش قابها و کندی ابزار برش).

با افزایش دما و رطوبت استحکام الیاف شیشه کاهش می یابد.

الیاف کربن – دارای قطری بین ۶ تا ۱۰ میکرومتر بوده و کاربردشان در حال افزایش می باشد.

مزایا – نسبت بسیار زیاد استحکام به وزن – نسبت بالای مدول کششی به وزن – استحکام بالای خستگی – ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین – مقاومت بالا در برابر خوردگی.

	نوع الیاف شیشه					
ترکیب درصدشیمیایی %	A	C	D	E	M	S
SiO_2	۷۲–۷۲/۵	۶۰–۶۵	۷۴/۵	۵۲–۵۶	۵۳/۷	۶۴/۳–۶۵
Al_2O_3	۰/۶–۱/۵	۴–۶	۰/۳	۱۲–۱۶	–	۲۴/۸–۲۵
Fe_2O_3	–	۰/۴	–	۰/۰۵ –۰/۴	۰/۵	۰–۰/۲
CaO	۹–۱۰	۱۳–۱۶	۰/۵	۱۶–۲۵	۱۲/۹	۰/۰۱
MgO	۲/۵–۳/۵	۳–۴	–	۰–۶	۹	۱۰–۱۰/۳
B_2O_3	–	۲–۷	۲۲	۸–۱۳	۳	–
Na_2O	۱۳–۱۴/۲	۷/۵–۱۲	۱/۰	۰–۱	–	۰–۰/۲۷
K_2O	–	۰–۲	۰–۱/۳		۲	–
TiO_2	–	–	–	۰–۰/۴	۷/۹–۸	–
SO_3	۰/۷	۰/۱	۰/۱	–	۸	–
F_2	–	–	–	۰–۰/۵	–	–
خواص فیزیکی مکانیکی:						
دانسیته	۲/۵	۲/۴۹	۲/۱۶	۲/۵۴–۲/۵۵	۲/۸۹	۲/۴۸–۲/۴۹
استحکام کششی، MPa	۲۴۱۴	۲۷۵۸	۲۴۱۴	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۴۶۰۰
مدول کششی، GPa	۷۲/۵	۷۰	۵۱/۷	۷۲/۴–۷۶	۱۱۰	۸۴–۸۸
ثابت دی الکتریک $21^\circ C, 10^6 Hz$	۶/۹	۶/۲۴–۶/۳	۳/۵۶–۳/۶۲	۵/۸۶–۶/۶	–	۴/۵۳–۴/۶

جدول۲) ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه

معایب: شکننده بودن – هادی الکتریکی – کرنش کم در شکست – قیمت بالا الیاف آرامید – پلیمرهای آرامیدی نقطه ذوب بالا، پایداری حرارتی عالی و مقاومت خوبی در برابر شعله دارند.

مهم ترین خواص الیاف آرامید عبارتند از:

نسبت استحکام و مدول به وزن بسیار عالی – مقاومت در مقابل ضربه – مقاومت خستگی خوب – مقاومت بسیار عالی در مقابل شکست ناشی از خزش – عدم حساسیت به شکاف یا ترک – مقاومت خوب در برابر اسیدها و بازها – خواص خوب استهلاک انرژی ارتعاشی – خواص دی الکتریک عالی نسبت به شیشه – خواص خود خاموش کنی با نشر دود کم – امکان استفاده مداوم تا دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتی گراد.

الیاف آرامیدی رنگ زرد مات داشته و برای برش آنها وسایل خاص مورد نیاز می باشد.

ماتریس های مورد استفاده در مواد مرکب:

این ماتریس ها به سه گروه کلی ، فلزی ، سرامیکی و پلیمری تقسیم می شوند که مواد مرکب با ماتریس پلیمری از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشند.

نقش ماتریس پلیمری عبارت است از: انتقال تنش بین الیاف تقویت کننده – احاطه کردن و نگهداشتن ساختار الیاف – محافظت الیاف از آسیب های محیطی – تاثیر در برش – نگهدارنده جانبی در مقابل خم شدگی الیاف در مقابل بار فشاری.

ماتریس های پلیمری مورد استفاده در صنعت به دو دسته پلیمرهای گرما نرم و گرما سخت تقسیم می شوند.

مهم ترین پلیمرهای گرماسخت عبارتند از: رزین های پلی استر، رزین های ونیل استر، رزین های اپوکسی، رزین های فنولیک، رزین های اپوکسی نووالاک و رزین های پلی آمین که پر مصرف ترین آنها پلی استرواپوکسی می باشد. مهم ترین پلیمرهای گرمانرم عبارتند از: پلی پروپیلن، پلی اتیلن و نایلونها.

برای کاهش قیمت، بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر آتش سوزی پرکننده ها به ماتریس های پلیمری اضافه می شود. مهم ترین پرکننده ها خاک رس، کربنات کلسیم و الیاف شیشه خرد شده می باشد.

رزین ها:

جهت اتصال ورق های FRP به بتن مورد استفاده قرار می گیرند. بایستی توجه داشت که اتصال ضعیف FRP به بتن ممکن است موجب جداشدگی بشود. استفاده از رزین هایی مثل اپوکسی می تواند باعث جلوگیری از جداشدگی ورق FRP از بتن بشود.

تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورق های FRP

مدهای مختلف شکست تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق FRP در مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و حالت های شکست به ۷ گروه اصلی زیر طبقه بندی شده است:

۱- شکست خمشی به صورت گسیختگی ورق FRP

۲- شکست خمشی به صورت خردشدن بتن فشاری

۳- شکست برشی

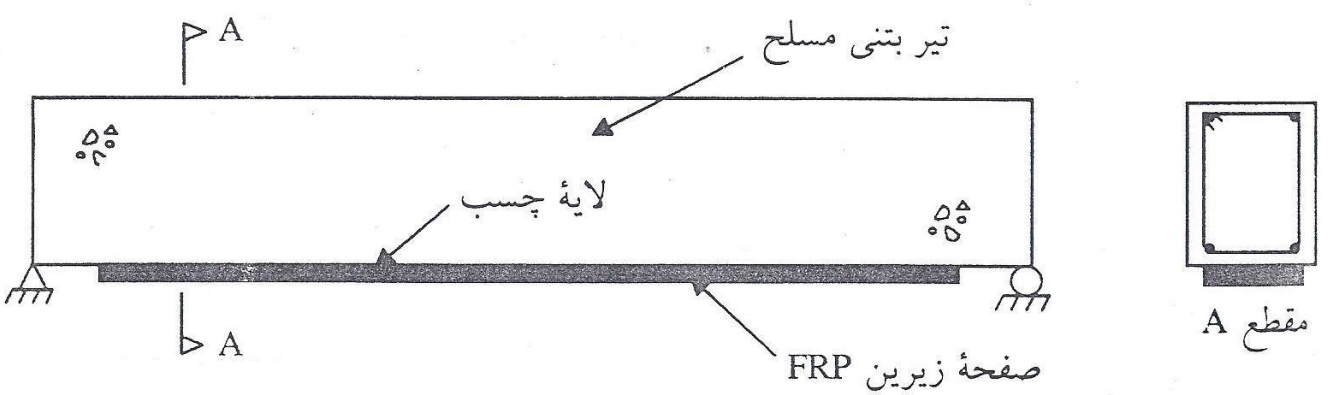
۴- جدا شدن بتن پوششی میل گردهای طولی از انتهای ورق FRP

۵- جدا شدن چسب از انتهای ورق FRP

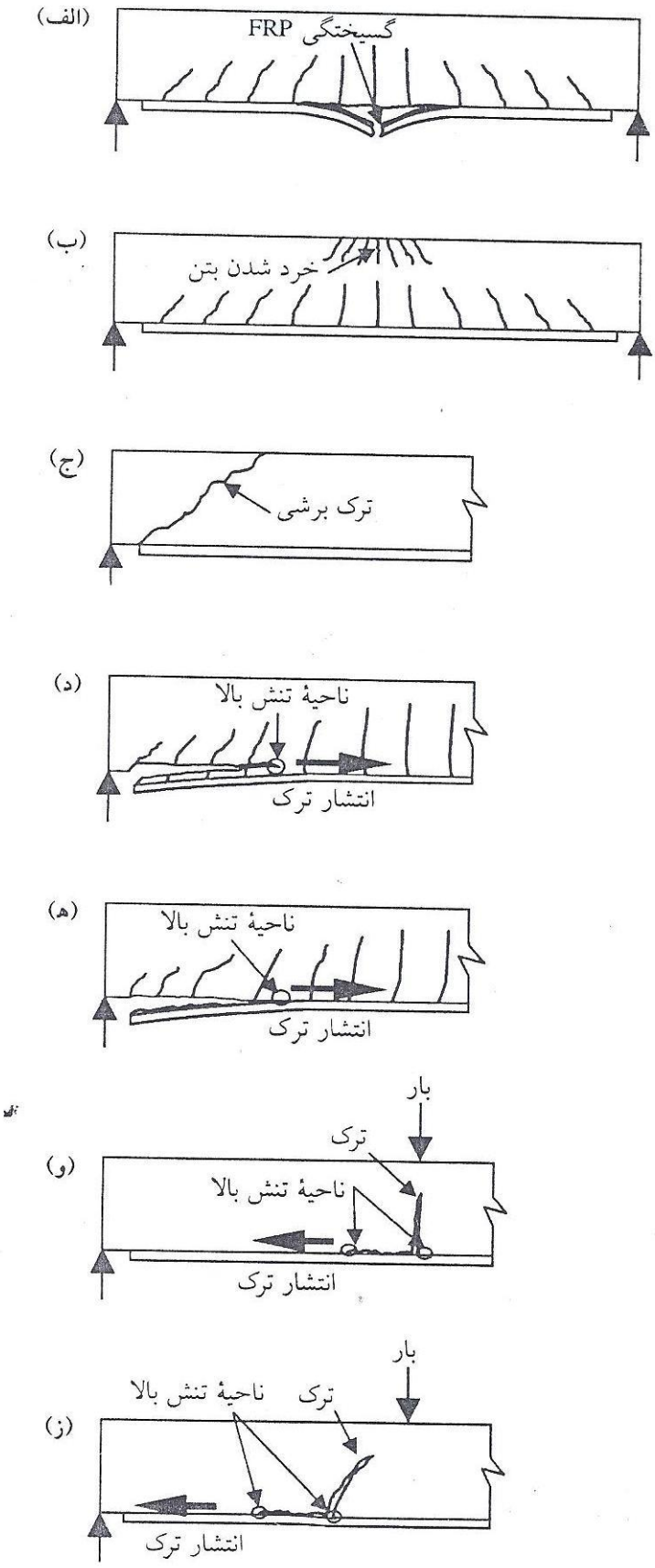
۶- جدا شدن ورق FRP ناشی از ترک خمشی

۷- جدا شدن ورق FRP ناشی از ترک خمشی – برشی

تمامی مدهای شکست دارای رفتار ترد می باشند. به ویژه شکست به شکل جدا شدن انتهای ورق کاملاً ترد و بدون هشدار صورت می گیرد.



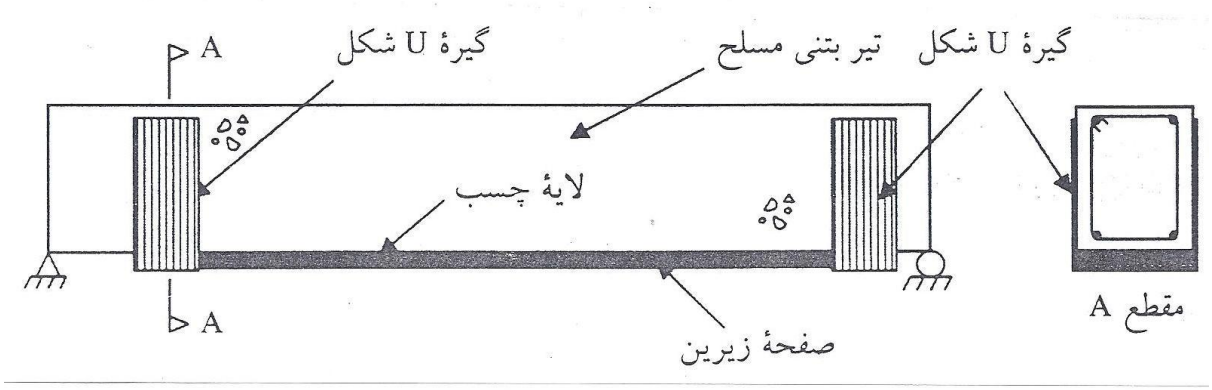
شکل ۱۳) تیر بتنی تقویت شده با صفحه زیرین FRP



شکل ۱۴) مودهای شکست

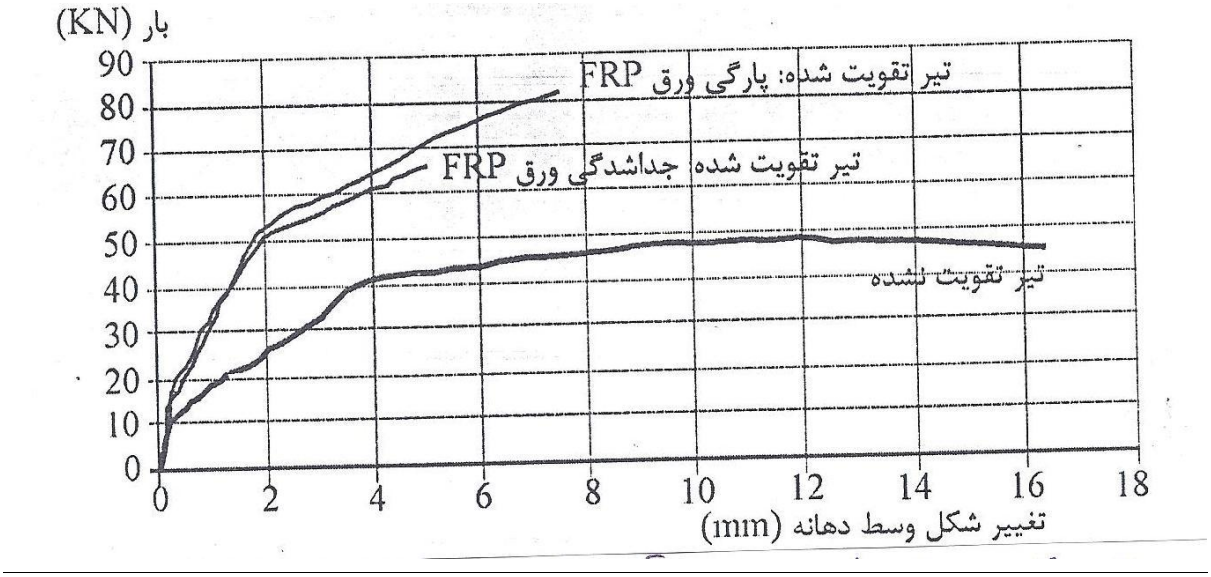
جدا شدن چسب انتهای ورق FRP هنگامی رخ می دهد که مقدار تنش های برشی و محوری موجود در انتهای ورق از مقاومت عضو ضعیف تر (بتن) تجاوز نماید. در این صورت لایه نازکی از بتن بر روی چسب های ورق های جدا شده مشاهده می گردد. وجود ناهمواری در سطح بتن و استفاده از چسب های نامرغوب احتمال وقوع این شکست را افزایش می دهد.

در بعضی شرایط جداشدگی ورق FRP از یک ترک خمشی و یا یک ترک خمشی – برشی در نقطه ای از بخش میانی تیر شروع می شود و سپس به طرف انتهای تیر انتشار می یابد. جدا شدگی معمولاً در سطح تماس چسب و بتن اتفاق می افتد و همواره لایه نازکی از بتن روی چسب باقی می ماند. با استفاده از مهارهای مکانیکی می توان از پدیده جدا شدگی ورق جلوگیری نمود. علاوه بر مهارهای مکانیکی(گیره های uشکل فولادی) می توان از نوارهای u شکل FRP استفاده نمود که به صورت پیچ و یا بولت می باشد.



شکل ۱۵) گیره های uشکل FRP جهت مهار کردن انتهای صفحه

چنانچه انتهای ورق به نحو مناسبی مهار شده باشد،شکست تیر به شکل خمشی اتفاق می افتد.شکست خمشی به شکل پارگی ورق یا خردشدن بتن فشاری رخ می دهد.همانطور که در شکل زیر مشاهده می گردد.مقاومت تیر تقویت شده بیش از ۷۰درصد افزایش یافته ولی شکل پذیری آن کاهش یافته است. افزایش مقاومت و کاهش شکل پذیری دو خاصیت مهم ترین تقویت شده با ورق FRP می باشد.



شکل) نمودارهای بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح و تقویت شده باFRP

نوع دیگر از شکست تیرهای تقویت شده شکست برشی است. شکست برش بسیار ترد است. چنانچه تیر بتن مسلح با ورقFRP تقویت گردد مقاومت خمشی آن افزایش می یابد اما به دلیل مشارکت اندک ورق FRP در مقاومت برشی تیر، مشکل شکست تیر ممکن است از خمشی به برشی تغییر یابد،که باید حتی الامکان از بروز آن اجتناب گردد.

دربعضی شرایط قبل از رسیدن به ظرفیت خمشی تیر به دلیل جدا شدن انتهای ورق ، شکست زود هنگام رخ می دهد. این جدایی معمولاً از انتهای ورق شروع می شود و غالباً به شکل جدا شدن پوشش میل گرد های طولی (و به ندرت به شکل جدا شدن چسب ورق FRP از سطح بتن)رخ می دهد.

تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با ورقهایFRP

شکست برشی و خمشی تیرها دو شکل اصلی شکست تیرهای بتنی می باشد. تیرها در وضعیت شکست خمشی شکل پذیری بیشتری نسبت به شکست برشی دارند پس شکست خمشی هشدار دهنده بوده و اجازه بازتوزیع تنشها را به سازه می دهد ولی شکست برشی ترد و ناگهانی بوده و در نتیجه مقاومت برشی تیر تقویت شده بایستی بیشتر از مقاومت خمشی باشد. روشهای مختلفی برای مقاوم سازی برشی تیرها وجود دارد ، ولی امروزه تقویت برشی با استفاده از نوارها و ورقهایFRP متداول می باشد.در تحقیقات مشاهده شده است که ورقهای FRP که در جهت طولی به طرفین تیر چسبانده شوند در مقاومت برشی تیر چندان تاثیری ندارند(البته در جلوگیری از باز شدگی ترک سودمند می باشند).

به منظور افزایش مقاومت برشی تیرهای بتنی از روش چسباندن ورق به دو طرف تیر،چسباندن ژاکتهای Uشکل به طرفین و وجه کششی تیر و دور پیچ نمودن آن استفاده می شود. به دلیل آنکه ورق FRP تنها در جهت طولی الیاف مقاومت دارد ، می توان ورق را در جهتی قرار داد که بیشترین تأثیر را در کنترل ترک برشی داشته باشد. بعلاوه به دلیل امکان تغییر جهت نیروی برشی در زلزله ، باید

الیاف را در دو جهت قرار داد تا ظرفیت برشی در دو جهت افزایش یابد. مشاهده شده است که کاربرد الیاف در دو جهت در شرایط عادی نیز مفید است و عملیات مقاوم سازی حالتهای مختلفی از نقطه نظر جهت الیاف ، توزیع آن و شکل چسباندن ورق FRP به کار می رود.

جدول ۳ شکل های چسباندن ورق های FRP را نشان می دهد.

در نام گذاری حرف اول نشان دهنده نحوه چسباندن الیاف(W ,U,S)،حرف دوم بیان گر توزیع الیاف و دو سری عدد انتهایی بیان گر زاویه الیاف سری اول و دوم است. مثلاً us45/135 بیانگر با نوارهای FRP ،u شکل در جهات۴۵و۱۳۵ درجه می باشد.

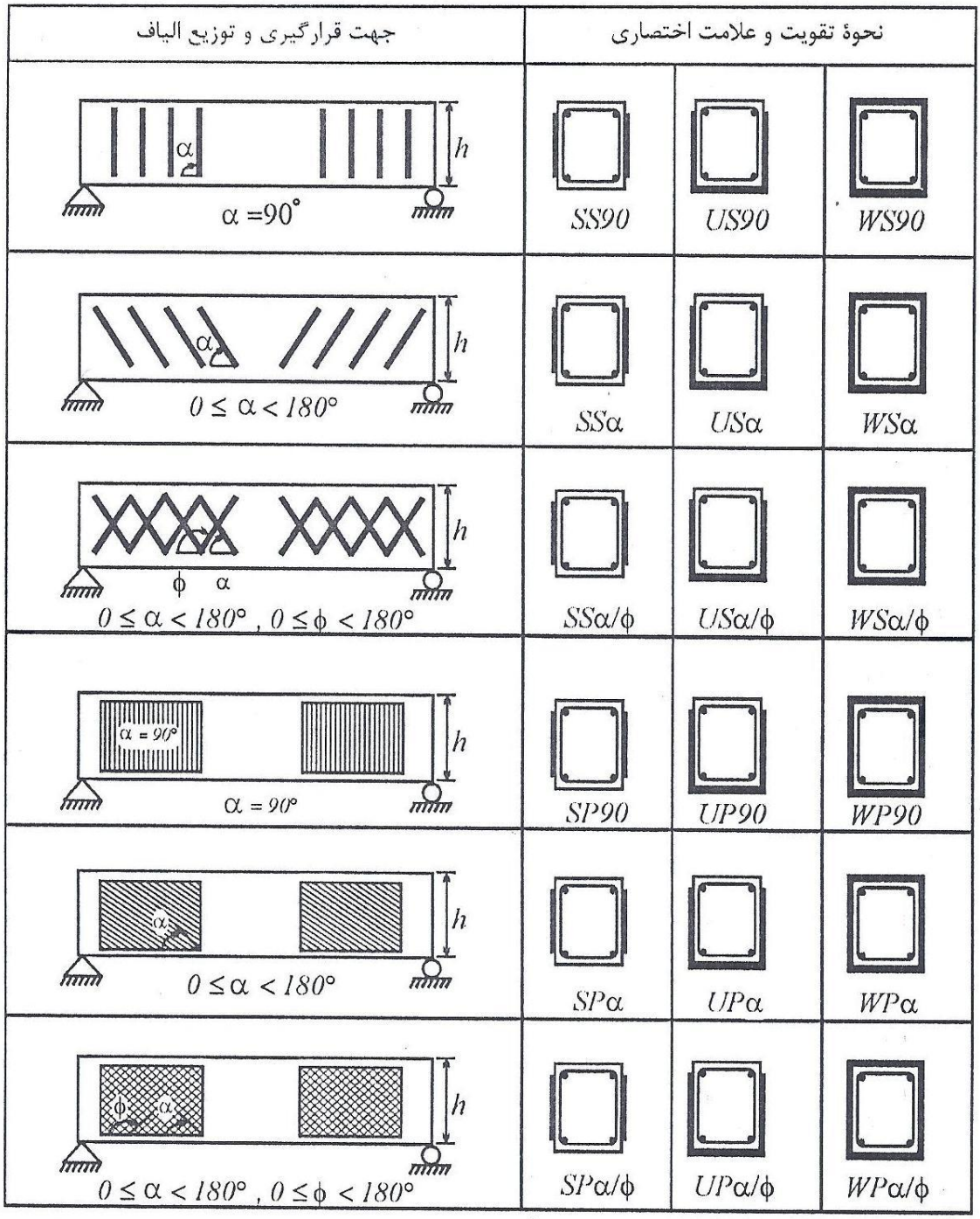
شکل۶-شکل های مختلف تقویت برشی را نشان می دهد.کاربرد مهارهای مکانیکی در انتهای آزاد نوارها یا ورقهای FRP ، Uشکل ممکن است ضروری باشد.در تقویت تیر های بتنی توسط نوار های FRP ، امکان استفاده بهینه از مصالح وجود دارد اما زمان مقاوم سازی طولانی می شود. اگر از ورقهای FRP جهت مقاوم سازی تیرها استفاده شود ، عملیات مقاوم سازی ساده تر می باشد و چنانچه تیر کاملاً دور پیچی شود ، در برابر عوامل محیطی نیز محافظت می گردد اما میزان مصرف مصالح افزایش می یابد.

جدول ۴- مزایا و معایب شکل های مختلف چسباندن ورقFRP در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح را نشان می دهد.

در آزمایشهای انجام شده بر روی تیرهای بتنی تقویت شده با ورقFRP وضعیت های مختلفی مشاهده می شود که شامل شکست همراه با پارگی ورقFRP ، شکست برش بدون پارگی ورق FRP و شکست برشی ناشی از جدایی ورقFRP و شکست های موضعی می باشد.

سیستم تقویتی	چسباندن به طرفین تیر	ژاکت U شکل	دورپیچی
علائم اختصاری	S	U	W
توضیحات	چسباندن FRP تنها به طرفین تیر	چسباندن سه قطعه به صورت جدا قابل قبول نیست و ژاکت U شکل باید پیوسته باشد. ژاکت U شکل متداول (طرفین + وجه کششی) ترجیح دارد اما ژاکت معکوس (طرفین+ وجه فشاری) را نیز می‌توان بکار برد.	ورق FRP باید دورتا دور مقطع با طول همپوشی کافی در وجه فشاری تیر، پیچانده شود. طول همپوشی بهتر است که در وجه فشاری مقطع صورت گیرد تا کرنش نسبی بین FRP و بتن در جهت الیاف کاهش یابد. در صورتیکه همپوشی در وجه فشاری میسر نباشد می‌توان همپوشی را در وجه کششی بکاربرد.
	در صورت امکان انتهای آزاد نوارها و یا ورق FRP باید به نحو مناسبی مهار گردد.		
	بمنظور جلوگیری از شکست FRP ناشی از تنش‌های خمشی در گوشه‌ها و جدایی FRP از روی وجه کششی یا فشاری، گوشه‌های تیر باید به نحو مناسبی گرد گردد.		

جدول۳) شکل چسباندن ورقFRP



شکل۱۶) شکل های مختلف تقویت برشی

سیستم تقویتی	مزایا	معایب
چسباندن ورق به طرفین تیر	سادگی عملیات مصرف کمتر مصالح FRP	احتمال زیاد جدایی ورق
ژاکت U شکل	وجه پایینی ژاکت U شکل مهار می گردد و احتمال جداشدگی کاهش می‌یابد. ورق‌های تقویت خمشی را مهار می‌نماید.	نیاز احتمالی به مهار مکانیکی در انتهای ژاکت U شکل
دورپیچی	کمترین احتمال جداشدگی ورق مهار ورق‌های تقویت خمشی	اگر یک وجه تیر در دسترس نباشد مانند حالت تیر و دال غیرممکن و یا بسیار مشکل است

جدول۴) مزایا و معایب شکل های مختلف چسباندن ورقFRP

شکست برشی همراه با پارگی ورق

این شکست اغلب همراه با یک ترک قطری کششی- برشی رخ می دهد. ابتدا ترک قائم خمشی در وجه کششی ایجاد شده و سپس یک ترک در نزدیکی تکیه گاه ظاهر می شود و با گسترش به طرف نقطه بارگذاری به صورت قطری گسترش می یابد. در برخی شرایط ترک قطری انقضاء ایجاد می گردد. با افزایش باز شدگی دهانه ترک کرنش ورق FRP به مقدار نهایی خود می رسد و پاره می شود. به دلیل گسترش سریع پارگی ورق در امتداد ترک قطری ، شکست تیر بسیار ترد است. در اغلب موارد قبل از شکست تیر، ورقFRP در طرفین آن به طور موضعی جدا می شود ولی شکست نهایی ناشی از پارگی ورق می باشد. اکثر تیرهای تقویت شده به صورت دور پیچی و نیمی از تیرهای تقویت شده با ژاکت های u شکل در این وضعیت می شکنند.

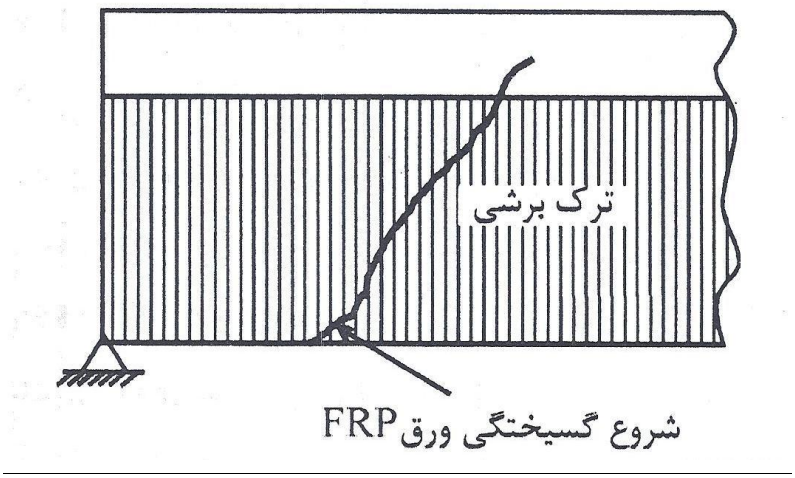
شکست برشی بدون پارگی ورق

در این حالت روند شکست مشابه مد قبلی است با این تفاوت که ورقFRP پاره نشده و بعد از شکست بتن ، ورق بار زیادی تحمل می کند. در آزمایشهایی که بر روی ورق هایAFRP انجام شد ، شکست با کرنش نهایی۲/۲۵ درصد مشاهده گردید.

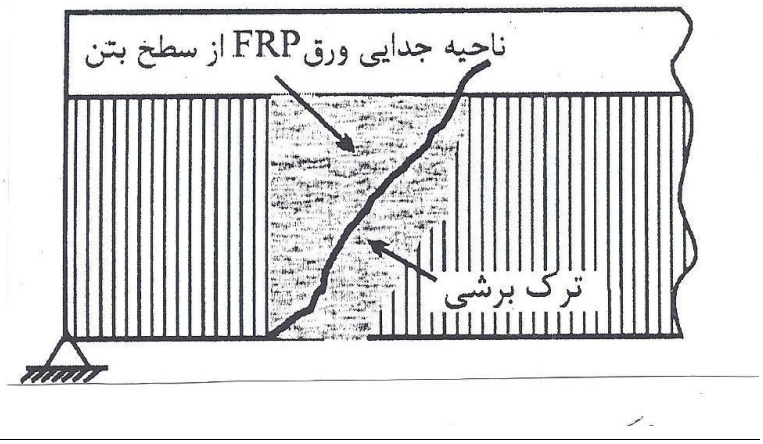
شکست برشی ناشی از جدایی ورقFRP

جدایی ورقFRP از تیر برای تیرهایی که به صورت U شکل و یا فقط در طرفین تقویت شده اند مشاهده گردیده است. هنگامی که ورق FRP شروع به جدا شدن از بتن می کند ، شکست به سرعت اتفاق می افتد. شکل پذیری این مد شکست بسیار کم است.

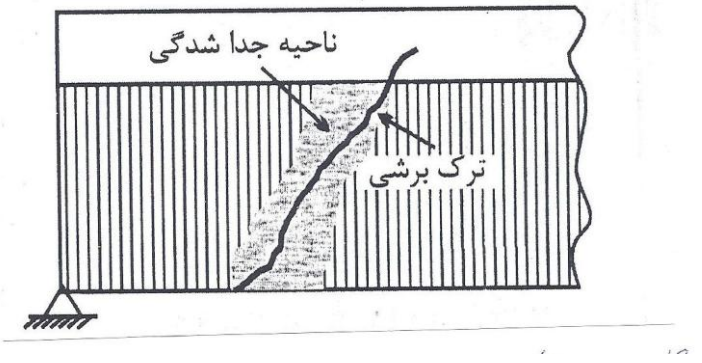
تحقیقات نشان می دهد که تقریباً تمامی تیرهائیکه تنها در دو طرف تقویت شده اند و بسیاری از تیرهای تقویت شده به صورت شکل در این حالت می کشند.



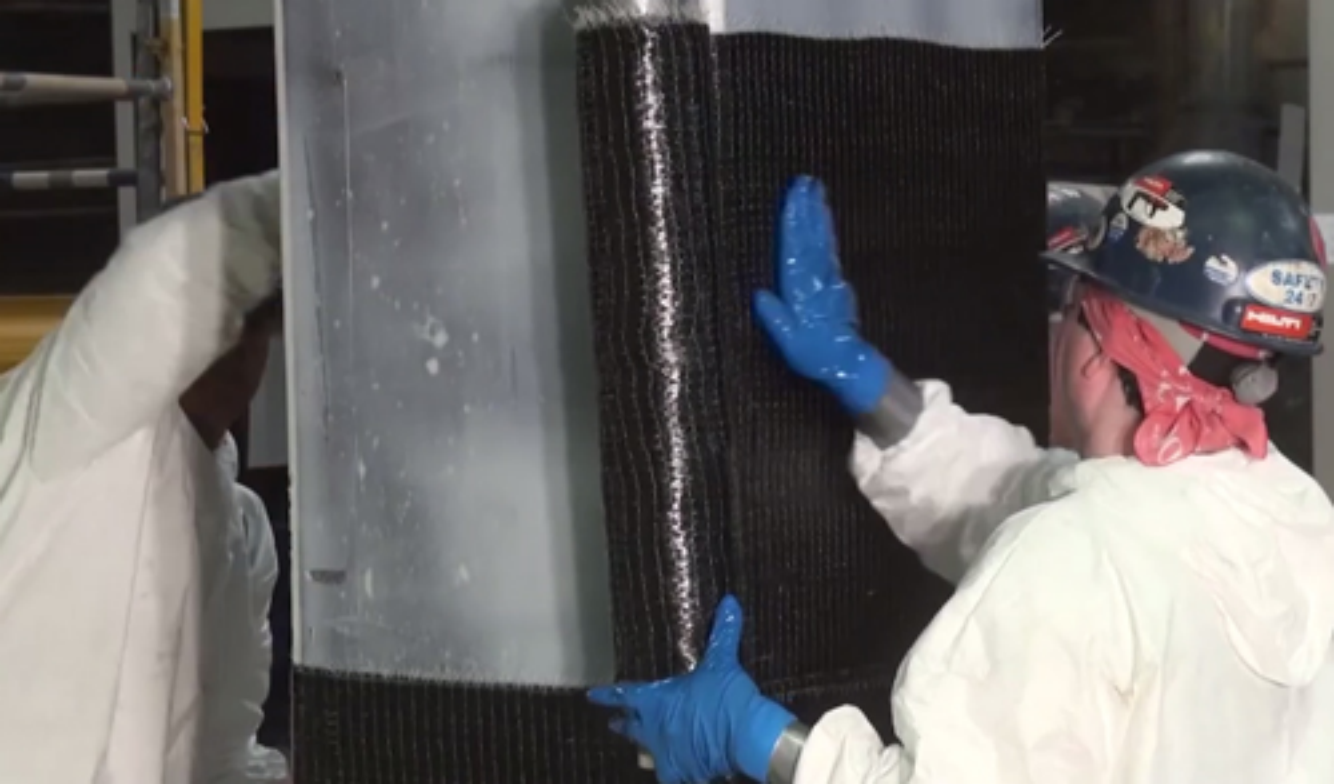
شکل – ترک قطری کششی-برشی همراه با پارگی ورقFRP



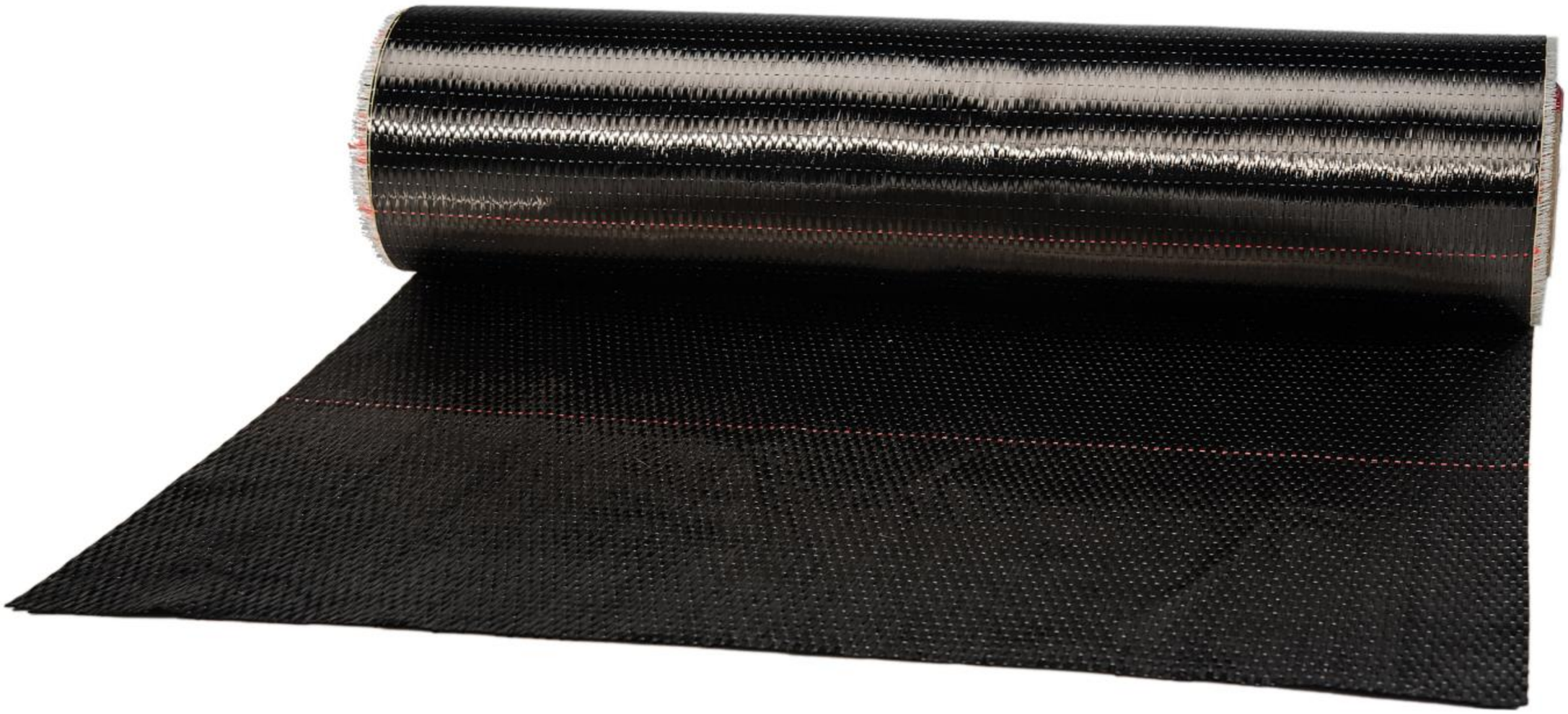
شکل-شکست برشی ناشی از جدایی ورقFRP(تقویت Uشکل)

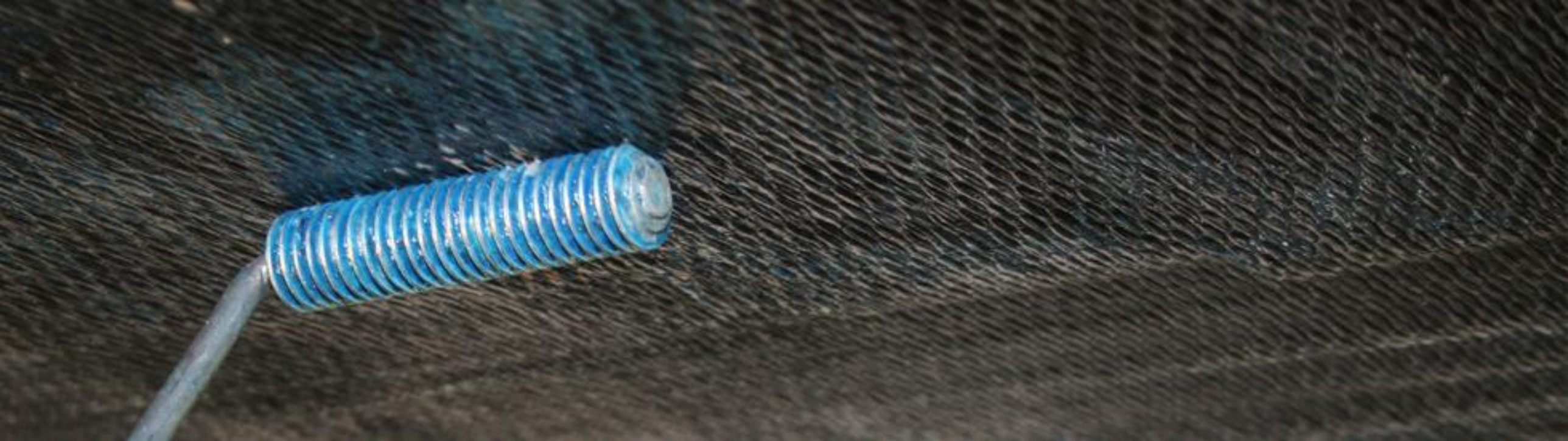


شکل- شکست برشی ناشی از جدایی ورقFRP(تقویت در طرفین تیر)



WAY





L
α