چکيده

استفاده از کامپوزیتهای با زمینه پلیمری در مقاومسازی سازههای بتنآرمه طی سالیان اخیر از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است. کاربری آسان مواد مرکب FRP به علت داشتن وزن کم، مقاومت کششی بالا و خاصیت ضدخوردگی باعث شده است که این مواد جایگزین مناسبی برای مصالح سنتی و شیوههای متعارف موجود باشند.

در این پایاننامه سعی شده است تا با بهره گیری از نرمافزار ANSYS رفتار تیرهای بتنآرمه مقاوم شده در برش با استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف بررسی شود. برای این منظور ابتدا مدل عددی تیر بتنآرمه مقاوم نشده به عنوان تیر کنترل و تیرهای مقاوم شده با کامپوزیت های پلیمری مسلح شده با الیاف کربن(CFRP) تحت زاویه ۴۵± و ۹۰ درجه مربوط به آزمایش نانی و همکاران(۱۹۹۷) شبیه سازی شد, که نمودارهای بار- تغییرمکان به دست آمده از روش عددی هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از تیرهای آزمایشگاهی داشتند و در نهایت برخی از پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیرهای بتنآرمه نظیر جهت و ضخامت الیاف, نسبت تقویت های برشی فولادی و نسبت دهانه برشی, به کمک نرمافزار ANSYS مورد بررسی قرار گرفت.

واژگان کلیدی:

مدل اجزاءمحدود، مواد مركب(FRP)، تقویت برشی، تیر بتن آرمه

فصل اول

مقدمه

از زمانی که اولین سازهها توسط طبیعت یا ساختههای دست بشر شکل گرفتند، فرسایش یا تخریب باعث ضعف در کارآیی آنها می شد. این کاستیها قانون طبیعت هستند که حتی بر سازههای مدرن امروزی نیز اثر گذارند. سازههای مدرن از قبیل آسمانخراشها و پلها بسیار پرهزینه بوده و زمان ساخت طولانی مدت آنها گاهی باعث ایجاد اختلالاتی در جامعه میشود. از طرفی جامعه اطراف ما و در نتیجه تقاضای مورد نیاز

در مورد سازههای موجود در حال تغییر است. حمل و نقل در حال سنگین تر شدن است، سرعت وسایط نقلیه افزایش یافته و …که همه نیاز به ایجاد تغییرات تقاضا در سازههای با دامنه عمر طولانی را بیشتر می کند. همچنین علوم مربوط به رفتار سازهای گسترش یافته که خود باعث آگاهی نسبت به عدم قابلیت مناسب برخی سازههاست. بنابراین احیاء سازه جهت رسیدن به کارآیی مناسب، همواره مورد توجه بوده است. یکی از روشهای ارتقاء سازه عمدتاً برای بالا بردن ظرفیت باربری و نیز دیگر سطوح کارآیی، مقاومسازی آن میباشد. به طور کلی, مقاومسازی سازههای موجود یا مرمت آنها به منظور تحمل بارهای مضاعف طراحی، بهبود نارساییهای ناشی از فرسایش, افزایش شکل پذیری و ... با استفاده از مصالح مناسب و شیوههای اجرایی صحیح به طور متعارف انجام می گردد. استفاده از صفحات فولادی به صورت پوشش خارجی، غلافهای بتنی یا فولادی و پس کشیدگی, تعدادی از روشهای متعارف موجود می باشند. استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP)، به عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوههای موجود معرفی شده است. از ویژگیهای اصلی کامپوزیتهای پلیمری می توان مقاومت مناسب در برابر خوردگی، سادگی اجرا در محل نصب و سبکی آنها را برشمرد. همچنین این مصالح به شکلهای مختلف و در گسترهای از انواع ورقهای چند لایه کارخانهای گرفته تا ورقههای خشک قابل پیچش روی اشکال مختلف سازهای قابل دسترس میباشند. لیکن امروزه تعداد قابل توجهی از آزمایشها و تحقیقات علمی به کاربرد این مصالح در مقاومسازی اختصاص دارد که این رشد فزاینده شاهد رویکرد و اهمیت این فناوری نو می باشد.

در سالهای اخیر, تلاشهای فراوانی جهت درک و ترویج استفاده از ترکیبات پلیمری برای مقاومسازی و بهسازی سازههای بتنی انجام شده است که به دنبال گسترش حوزه کاربرد این مصالح در تقویت اعضای مختلف سازههای بتنآرمه و به منظور کاربردی نمودن این دانش فنی, روشهای طراحی و دستورالعملها و آییننامههای محاسباتی و اجرایی تدوین گردیدند که از آن جمله میتوان به آییننامههای ACI 440R آمریکا, CSA کانادا و fib اروپا اشاره نمود.

استفاده از ترکیبات پلیمری برای مقاومسازی تیرها و دالها در خمش ونیز تقویت اعضای فشاری موضوعاتی هستند که تاکنون بهخوبی به آنها پرداخته شده است, لیکن علیرغم تحقیقات مناسب در این زمینهها, مقاومسازی برشی تیرها با استفاده از ترکیبات پلیمری هنوزتحت بررسی بوده و نتایج بهدست آمده تاکنون کم وگاهی محافظه کاران هستند.

با توجه به رشد کاربرد مصالح تقویتی پلیمرهای الیافی در کشور و تقاضا برای استفاده از این فناوری به منظور مقاوم سازی سازههای بتنی اقدام به تهیه این پایاننامه گردید که اهداف آن شامل:

بررسی نحوه مقاومسازی برشی تیرهای بتنآرمه با استفاده از صفحات پلیمری
 بررسی فواید و نقطه ضعفهای استفاده از ترکیبات پلیمری برای مقاومسازی برشی تیرها
 ارزیابی روش المان محدود درآنالیز رفتار تیرهای تقویت شده با صفحات پلیمری در برش

- بررسی و ارزش گذاری موضوع برای تحقیقات آینده

این مجموعه در ۶ فصل تهیه شده که به منظور ارائه دید کلی در مورد آن، فصول مربوط، با توصیف مختصر محتوی در زیر آورده شده است.

- در فصل دوم خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرهای الیافی, مراحل آمادهسازی سطح بتن و نصب کامپوزیتهای پلیمری و پلیمرهای الیافی متداول به اجمال بررسی می شوند.

– در فصل سوم ابتدا مختصری در مورد تقویت خمشی تیرها و مکانیزمهای شکست خمشی بحث شده و سپس تقویت برشی تیرهای بتنآرمه با پلیمرهای الیافی شامل الگوهای مختلف تقویت، پارامترهای مؤثر در تقویت برشی و مکانیزمهای شکست تیرهای تقویت شده تشریح می شود.

– افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیرهای تقویت شده، بستگی به انتقال تنشهای پیوستگی ایجاد شده بین کامپوزیتهای الیافی و بتن دارد, لذا در فصل چهارم پیوستگی پلیمرهای الیافی، انواع شکست پیوستگی، روابط تنش پیوستگی و برشی-لغزش و روابط پیوستگی ارائه شده توسط محققین مختلف شامل مقاومت پیوستگی و طول مهاری مؤثر بررسی میشود.

– درفصل پنجم به تشریح خلاصه روشهای ارائه شده توسط محققین مختلف برای پیشبینی ظرفیت برشی تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با FRP پرداخته میشود.

– در فصل ششم ابتدا مدل عددی تیر بتنآرمه مقاومنشده به عنوان تیر کنترل و تیرهای مقاومشده با کامپوزیتهای پلیمری مسلح شده با الیاف کربن(CFRP) تحت زاویه ۴۵± و ۹۰ درجه مربوط به آزمایش نانی و همکاران(۱۹۹۷) شبیه سازی شده, سپس برخی از پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیرهای بتنآرمه نظیر جهت و ضخامت الیاف, نسبت تقویتهای برشی فولادی و نسبت دهانه برشی به کمک نرمافزار ANSYS مورد بررسی قرار می گیرد.

- فصل هفتم شامل نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای مطالعات تحقیقی بیشتر در زمینه تقویت برشی تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با کامپوزیتهای پلیمری الیافی می باشد.

- در پیوست موضوعات عمومی در به کارگیری نرمافزار ANSYS ارائه می شود.

فصل دوم

آشنایی با مواد پلیمری الیافی

۲-۱- پیشگفتار

استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف یا FRP در بهسازی و مرمت سازهها طی ۵۰ سال اخیر از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است, که دلیل عمده آن نیاز به افزایش عمر بهرهبرداری و ارتقای اساسی زیرساختها در تمامی نقاط دنیا میباشد.

استفاده کاربردی از مواد FRP به سالهای جنگ جهانی دوم برمی گردد. در آن زمان از FRP به عنوان یک ماده پلیمری در سـاخت سازههای نظامی استفاده میشد. پس از جنگ جهانی ابتدا FRP به صورت یک جسم شیشهای جامد برای ساخت چوب ماهی گیری و گلف، پایه پرچم و چوب اسکی و ... مورد استفاده قرار می گرفت. به تدریج به دلیل مقاومت کشـشـی و فشاری بالا و همچنین قابلیت نارسایی الکتریکی در ساخت تجهیزات الکتریکی به کار رفت. سـهولت در تولید و امکان دستیابی به شکلهای پیچیده این ترکیبات نسبتا گران موجب شد که به سرعت جای خود را در میان طراحان باز کند. در سال ۱۹۶۵ تکنولوژی FRP با تولید رزینهای مخصوص گسترش یافت. پس از آن در اروپا از سیستمهای FRP به عنوان جایگزینی برای ورقهای فولادی متصـل شده به نواحی کششی قطعات بتنی جهت افزایش مقاومت خمشی استفاده شد. تحقیقات در این زمینه تقریباً از سـالهای ۱۹۳۰ به بعد در آمریکا آغاز شـده بود. ولی بررسی جدی این مسأله به اواسط این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع در زلزله Hyoken Nanbu در سـال ۱۹۹۹ اسـتفاده از این مواد به طور قابل ملاحظهای در این کشور افزایش یافت. در سوئیس برای اولین بار FRP در تقویت پلهای بتنی به کار گرفته شد[۱].

۲-۲- کاربرد و شرایط استفاده

سیستمهای FRP میتوانند به منظور بازسازی یا حفظ استحکام یک عضو سازهای فرسوده، مرمت یا مقاومسازی عضو سازهای سالم به منظور تحمل بارهای افزایشیافته به سبب تغییر در کاربری سازه و یا جبران خطاهای طراحی و اجرا, به کار روند. این سیستمها با نصب برروی سطح دالها، تیرها و ستونها در ساختمانهای مسکونی، تجاری، صنعتی، و تکیهگاههای ماشینآلات تاسیسات سنگین, سازههای آبی از قبیل، کانالها، پلها، مخازن و منابع آب و مایعات، سیلوها و برجهای خنککننده مورد استفاده قرار میگیرند. برای استفاده از سیستم FRP در پروژرههای خاص، لازم است وضعیت موجود سازه از قبیل ظرفیت باربری، شناسایی نقایص و عوامل آن و شرایط سطوح بتن ارزیابی شود. ارزیابی کمّی میتواند شامل بازرسی دقیق میدانی و اخذ اطلاعات لازم، مروری بر مدارک طراحی موجود سازه اجرا شده و تحلیل سازه باشد[۲].

FRP – مواد تشکیل دهنده FRP FRP نوعی ماده کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین از جنس پلیمر احاطه شده است.



شکل(۲-۱) اجزای تشکیل دهنده FRP [۳]

۲-۳-۱- رزینها و بلیمری شامل اندودها، خمیرها، پرکنندهها، بتونهها و چسبها در سیستمهای طیف گستردهای از رزینهای پلیمری شامل اندودها، خمیرها، پرکنندهها، بتونهها و چسبها در سیستمهای FRP استفاده میشوند. از جمله متداول ترین رزینها میتوان به اپوکسیها، وینیل استرها و پلی استرها اشاره کرد که در گستره وسیعی از شرایط محیطی به کار میروند. از مهم ترین خواص این رزینها میتوان به مقاومت بالا، قابلیت چسبندگی عالی به بسیاری از مواد همچون فلزات، بتن, چوب، شیشه، سرامیک, مقاومت شیمیایی بالا به ویژه در محیطهای قلیایی و … اشاره نمود [۴].
 مقاومت بالا، قابلیت چسبندگی عالی به بسیاری از مواد همچون فلزات، بتن, چوب، شیشه، سرامیک, مقاومت شیمیایی بالا به ویژه در محیطهای قلیایی و … اشاره نمود [۴].
 متعن از شرای از فیبر تقویتی به ماده مجاور
 محافظت از فیبر در برابر شرایط محیطی
 محافظت از فیبر در برابر شرایط محیطی

۲-۳-۲ الياف

الیاف اصلی ترین عنصر در سیستم FRP است که سختی و مقاومت این سیستم را تشکیل داده و بالاترین کسر حجمی را در ساختار آن در بر می گیرد.

عملکرد الیاف تقویتی بستگی به جهت قرار گیری الیاف، طول، شکل، جنس و ترکیب آن با رزین پلیمری دارد. بنابراین انتخاب صحیح هر یک از این مشخصهها تأثیر بسزایی در خصوصیات مختلف آن نظیر جرم مخصوص، استحکام کششی، مدول کششی, استحکام فشاری، مکانیزم شکست، قیمت و دیگر خواص آن خواهد داشت.

عمده ترین الیاف مصرفی در ساختار سیستم FRP, شیشه، کربن و آرمید میباشد که در ادامه هر یک به اختصار تشریح می شوند[۵].

۲-۳-۲-۱ الیاف شیشه

این الیاف بالاترین حجم مصرف را دارند. و عمومی ترین نوع الیاف مصرفی در ساختار مواد مرکب میباشند. قیمت نسبتاً پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایق (حرارتی ـ الکتریکی) از جمله مزایای این الیاف میباشد. همچنین وجود خواصی مانند شکنندگی، مقاومت خستگی نسبتاً پایین، مدول نسبتاً پایین در مقایسه با دیگر الیاف و حساسیت به سایش موجب محدودیت در استفاده از آنها میشود. انواع اشکال موجود الیاف شیشه عبارتند از: الیاف به صورت نخ (varn)، رشتهای (roving)، پارچهای در انواع بافت ها (ساده، زاویهدار، چند لایه زاویهای در وزنهای مختلف)، سوزنی و نمدی (با الیاف به طول ۲۵ ۲۵ و الیاف بلند پیوسته)، نواری و به صورت سه بعدی (ترکیبی از سوزنی، پارچه زاویهدار و رشتهای) [۵].

۲-۳-۲-۲ الیاف آرامید

این الیاف در دهه ۷۰ میلادی وارد بازار شدند و دارای ترکیبات عالی آروماتیک از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن (پلی آمید آروماتیک) میباشند. همچنین از طریق ریسندگی محلول پلیآمید با زنجیره بلند تهیه میشوند. از مزایای این الیاف میتوان به جرم مخصوص پایین، مدول کششی بالا، استحکام کششی بالا، مقاومت بالا در برابر ضربه اشاره نمود. از طرفی وجود خواصی همچون مقاومت فشاری پایین، مشکلات برشکاری و حساسیت به نور ماوراء بنفش و نورخورشید (کاهش قابل ملاحظهای در استحکام کششی و رنگیریدگی محلول پلیآمید با زنجیره بلند تهیه میشوند. از مرایای این الیاف میتوان به جرم مخصوص پایین، مدول کششی بالا، استحکام کششی بالا، مقاومت بالا، میتحکام کششی بالا، میتحکام کششی بالا، استحکام کششی بالا، مقاومت فشاری پایین، مشکلات مقاومت بالا در برابر ضربه اشاره نمود. از طرفی وجود خواصی همچون مقاومت فشاری پایین، مشکلات برشکاری و حساسیت به نور ماوراء بنفش و نورخورشید (کاهش قابل ملاحظهای در استحکام کششی و رنگپریدگی) باعث محدودیت استفاده از این الیاف میشود.

الیاف بلند به صورتهای مختلف ا ز قبیل نخ, رشتهای, پارچهای در انواع بافت و وزن و به صورت ترکیبی با الیاف کربن و شیشه (که در این حالت میتوان محدودیتهای موجود در هر یک را تا حدی با الیاف دیگر پوشش داد) یافت میشود. الیاف کوتاه در اندازه های۱ mm ۲۵ mm جهت ترکیبات قالبگیری استفاده میشوند[۵].

۲-۳-۲-۳- الياف كربن

الیاف کربن شامل آلیاژی از کربن آمرف و کربن گرافیتی میباشند. اتمهای کربن در صفحات موازی از شش ضلعی منظم تشکیل شدهاند که این صفحات توسط نیروهای واندروالس به یکدیگر نگاه داشته شده و در هر صفحه بین اتمهای کربن پیوندهای بسیار قوی کووالانسی وجود دارد. مزایای این الیاف عبارتند از: استحکام کششی بالا، مدول کششی بالا، وزن مخصوص پایین، ضریب انبساط حرارتی پایین و استحکام خستگی بالا، از طرفی پایین بودن مقاومت در برابر ضربه (شکنندگی)، بالا بودن هدایت الکتریکی، کرنش پایین در زمان شکست و قیمت بسیار بالا، جزء محدودیتهای آنها میباشد. از قابلیتهای ویژه الیاف کربن باقیماندن خواص در محدوده دمایی ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد (در محیط خلاء و غیر اکسیدی) است، البته این خصوصیات برای استفاده در مواد مرکب با بستر پلیمری چندان مفید نیست ولی کاربردهای ویژه ای از جمله در نیروگاههای هستهای و کورههای سنتزکننده دارد. انواع الیاف بلند به صورتهای مختلف از قبیل نخ، رشتهای، پارچهای ساده بافت و غیره در انواع وزنها، نمدی و نواری وجود دارند. از طرفی الیاف کوتاه در اندازه mm ۱ الی mm ۲۵ جهت ترکیبات قالب گیری در پلاستیکها و در اندازه mm ۵ موجود

۲-۴- خصوصیات فیزیکی

۲-۴-۲- چگالی چگالی مصالح FRP در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که ۴ تا ۶ بار کمتر از چگالی فولاد میباشد (جدول(۲-۱)). این کاهش چگالی میتواند منجر به کاهش هزینه حملونقل, سهولت در جابجایی مصالح و همچنین کاهش بار مرده سازه تقویتشده گردد.[1]

		ر(۱-۱) چکانی تر نیبات ۲	جدو
فولاد	GFRP	CFRP	AFRP
۷۹۰۰	1771	1018	1210

جدول(۲-۱) چگالی ترکیبات FRP و فولاد ³ Kg/m

۲-۴-۲ اثرات دمای بالا

در دمای بیشتر از T_g، مدول الاستیسیته پلیمر با توجه به تغییرات ساختار مولکولی آن کاهش مییابد. دمای T_g, بستگی به نوع رزین دارد ولی معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۸۲ درجه سانتیگراد می باشد. در یک کامپوزیت FRP، الیاف که خصوصیات حرارتی بهتری نسبت به رزین دارند، می توانند مقداری از بار را در جهت طولی تا cral دمای نهایی تحمل خود انتقال دهند. این دما برای الیاف شیشه، آرامید و کربن به ترتیب ۱۰۰۰٬۱۷۵ و ۲۷۵ درجه سانتیگراد می باشد (۲

۲-۵- خصوصیات مکانیکی

۲–۵–۱– رفتار کششی

در بارگذاری کشش مستقیم، مصالح FRP قبل از گسیختگی هیچگونه رفتار خمیری ندارند. رفتار کششی مصالح FRP با یک نوع الیاف، توسط یک رابطه تنش-کرنش خطی الاستیک تا هنگام شکست که به طور ناگهانی اتفاق میافتد، مشخص میشود. مقاومت کششی و سختی مصالح FRP به عوامل متعددی بستگی دارد. از آنجا که در مصالح FRP الیاف نقش اصلی در باربری را دارند, نوع الیاف، جهت قرارگیری و همچنین مقدار آنها مهمترین نقش را در خواص کششی مصالح FRP ایفاء میکنند.

۲-۵-۲ رفتار فشاری

سیستمهای تقویت FRP که به صورت پوشش بیرونی عمل می کنند, نباید به عنوان تقویت کننده فشاری مورد استمهای تقویت کنیده فشاری مورد استفاده قرار گیرند. مقاومت فشاری سیستم FRP با الیاف شیشه، کربن و آرامید به ترتیب حدود ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد مقاومت کششی آنها می باشد.

FRP انتخاب نوع سيستم

۲-۶-۱ ملاحظات محیطی

شرایط محیطی به طور ویژهای بر رزینها و الیاف در انواع سیستم FRP تاثیر می گذارد. مشخصات مکانیکی (برای مثال، مقاومت کششی، کرنش و مدول الاستیسیته) بعضی از سیستمهایFRP به واسطه قرار گرفتن در معرض عوامل محیطی، مانند محیط قلیایی، آب نمک، مواد شیمیایی، اشعه فرابنفش، درجه حرارتهای بالا، رطوبت بالا و دورههای یخ زدن و آب شدن کاهش مییابد. بعضی از ملاحظات محیطی مهم که وابسته به طبیعت سیستمها هستند در زیر ذکر شدهاند.

محیط قلیایی یا اسیدی: عملکرد سیستم FRP در محیطهای قلیایی و اسیدی در بیشتر اوقات بستگی به رزین و الیاف تقویت کننده دارد. الیاف کربن خشک و غیر اشباع یا بدون محافظ، در برابر عوامل محیطی اسیدی و قلیایی مقاوم هستند. در حالی که الیاف شیشه در بیشتر اوقات نسبت به این عوامل حساس بوده و از نظر خواص کاهش پیدا میکنند. با این وجود یک رزین مناسب میتواند از تاثیر این عوامل روی الیاف، محافظت نماید.

انبساط حرارتی: سیستمهای FRP ممکن است خصوصیات انبساط حرارتی متفاوتی نسبت به بتن داشته باشند. ضمن آنکه، خصوصیات انبساط حرارتی الیاف و پلیمر تشکیل دهنده سیستم FRP میتوانند تغییر کنند. الیاف شیشه, ضریب انبساط حرارتی مشابه با بتن دارد. محاسبه تغییرات کرنش ناشی از حرارت، پیچیده بوده و به متغیرهایی مانند راستای الیاف، درصد حجمی الیاف(نسبت حجم الیاف به حجم کل) و ضخامت لایههای چسب وابسته میباشد.

رسانایی الکتریکی: الیاف شیشه و الیاف آرامید در عایقبندی الکتریکی مؤثر میباشند ولی الیاف کربن رسانا هستند. به همین دلیل برای جلوگیری از خوردگی الکتروشیمیایی فولاد، مصالح FRP با پایه کربن نباید با فولاد تماس مستقیم داشته باشند.

۲-۶-۲ ملاحظات بارگذاری

شرایط بارگذاری در سیستمهایFRP با الیاف مختلف تاثیر میگذارد. لازم است سیستم FRP بر پایه دانش مربوط به رفتار سیستم تحت شرایط مورد نظر انتخاب شود. بعضی از ملاحظات بارگذاریهای مهم که مربوط به رفتار سیستم است، به شرح زیر میباشند:

تحمل ضربه: سیستمهای با الیاف شیشه و آرامید تحمل بهتری در ضربه نسبت به سیستمهای با الیاف کربن از خود نشان میدهند.

گسیختگی ناشی از خزش و خستگی: سیستمهای با الیاف کربن مقاومت زیادی در برابر گسیختگی خزشی تحت بارهای مداوم و پیوسته و همچنین گسیختگی ناشی از خستگی تحت بارهای نوسانی از خود نشان میدهند. سیستمها با الیاف شیشه نسبت به هر دو شرایط بارگذاری، حساستر میباشند[۱].

قصل سوم

1-3- ييشىگفتار

در مراجع مختلف تعاريف گوناگوني از مقاومسازي انجام شده است كه به عنوان يك تعريف جامع و كامل ميتوان چنين بيان نمود: « اصلاح منطقي خصوصيات سازه اي يك ساختمان موجود براي بهبود عملكرد آن». ديوار هاي برشي، قابهاي خمشي، ديافراگمهاي افقي و اتصالات, بيش از همه مستعد خسارت هستند و هركدام به نحو مشخصي گسيخته ميشوند. اقدامات متداول براي تعمير و تقويت عبارتند از:

- 1- خارجسازي اعضاء خسارت ديده و جايگزيني آن توسط اعضاي جديد
 - 3- ضخيم نمودن و بزرگسازي اعضاء

3- اضافه نمودن ديوار هاي برشي، مهاربندي هاي قائم هم مركز و خارج از مركز وستون هاي جديد به سازه

4- تبديل اتصالات برشي به اتصالات مقاوم خمشي

5-كاهش جرم به وسيله حذف طبقات فوقاني و ...

تقسيمبندي درمقاومسازي سازهها ميتواند به شكل كمّيتري نيز بيان شود, بدين صورت كه مقاومسازي ممكن است به دو روش افزايش مقاومت و يا افزايش شـكلپذيري انجام پذيرد. روش افزايش مقاومت غالباً وقتي مورد اسـتفاده قرار ميگيرد كه مقاومت سازه كافي نبوده و بالا بردن شكلپذيري آن نيز به راحتي ميسر نباشد, كه ميتوان به روشهايي از قبيل اضافه نمودن ديوار بال¹ به ستونها و ديوارهاي برشي، اضافه نمودن مهاربندها و... اشاره نمود.

در مواردي كه مقاومت سازه ناكافي بوده و مقاومسازي آن از طريق مهاربندها و ديوارهاي برشي امكان پذير نباشد, اصلاح شكل پذيري ميتواند به عنوان يك گزينه مفيد و قابل بررسي مورد توجه قرار گيرد. به عنوان مثال با تقويت برشي در تيرها ميتوان شكست برشي را به گسيختگي خمشي تغيير داد، كه باعث افزايش شكل پذيري سازه ميشود.

به طور كلي مقاومسازي ساز هاي بتني موجود يا مرمت آنها با استفاده از مصالح مناسب و شيوههاي اجرايي صحيح به طور متعارف انجام ميگردد. استفاده از مواد مركب FRP به عنوان يك ضرورت در جايگزيني مصالح سنتي و شيوههاي موجود معرفي شده است.

همانطور كه در فصل قبل اشاره شد, مصالح FRP، سبك، مقاوم در برابر خوردگي و داراي مقاومت كششي بالا ميياشند. اين مصالح به شكلهاي مختلف و در گسترهاي از انواع ورقههاي چند لايه كارخانهاي گرفته تا ورقههاي خشك قابل پيچش روي اشكال مختلف سازهاي قابل دسترس ميياشند. از مواد FRP ميتوان براي تقويت انواع سازهها از جمله تيرها، ستونها، دالها و ديوارها استفاده كرد. موضوع تقويت بسته به نوع عضو تقويت شده ممكن است يكي از موارد زير باشد.

- 1- افزايش ظرفيت بار محوري، بار خمشي و بار برشي
 - 2- افزايش شكلپذيري براي بهبود علمكردهاي لرزماي
- 3- افزايش سختي براي كاهش تغيير شكل سازه تحت بارهاي طراحي و سرويس.
 - **4**۔ افزایش عمر خستگي
 - 5۔ افزایش تداوم عملکرد در مقابل اثرات محیطی۔

در اين فصل با توجه به نتايج آزمايشها و تحقيقات انجام شده, مقاومسازي خمشي و برشي تيرهاي بتنآرمه تقويت شده با ورقه FRP مورد بررسي قرار ميگيرد.

2-3- مقاومسازي خمشى تيرهاي بتنآرمه با ورق FRP

روكشهاي پليمري FRP به منظور مقاومسازي و بهسازي خمشي سازههاي بتني اولين بار در سال **1980** توسط مير² در آزمايشگاه مركزي تست مصالح سوئيس مورد استفاده قرار گرفت. اتصال ورقههاي فولادي به ناحيه كششي اعضاء بتني جهت افزايش مقاومت خمشي به عنوان روشي مطرح و بادوام مرسوم ميياشد, اما به دليل خوردگي فولاد و همچنين ضعفهايي كه در روند اجرا دارد, نميتواند روش مناسبي در تأمين مقاومت مورد نظر سازه باشد. لذا امروزه بيشتر تحقيقات بر روي جايگزيني مواد FRP به جاي فولاد متمركز شده است. براي مقاومسازي خمشي، ورقهاي FRP به كمك چسب به سطح زيرين تير متصل

مي شوند **[6].**



شكل **1-3-** مقاوم سازي خمشي تير هاي بتن آرمه با ورقه FRP [6]

براي كاهش ريسك عدم پيوند ورق با تير, ميتوان از ورقههاي پيشساخته يا مهارهاي U شكل در انتهاي ورق استفاده كرد, كه استفاده از تسمه U شكل فولادي يا از جنس FRP معمولتر است. اين تسمهها ميتوانند با پيچ يا چسب به انتهاي تير متصل شوند.

ورقههاي FRP متصل شده به قسمت تحتاني تير را ميتوان به صورت تنيدهنشده³ يا پيشتنيده⁴ به كار برد.



شکل**2-3-** تیر بتن آرمه مقاوم شده با ورقه FRP با مهار U شکل[7]

1-2-3 ورقەھاي زيرين تنيدەنشدە

اين روش نسبت به حالت پيشتنيده كاربرد وسيعتري دارد. لذا اكثر تحقيقات روي اين روش متمركز شده است. 3 روش جهت جسباندن ورقهها به كف تير بتن آرمه وجود دارد[1].

- ورقه هاي پيش ساخته FRP با فرايند پلتروژن⁵

- ورقه هاي آماده شده در محل (دست ساز)⁶

۔ روش تزریق چسب

در روش اول ابتدا ورقهها با استفاده از قالبهايي متناسب با شكل مقطع, ساختهشده و سپس به سطح زيرين تير بتنآرمه چسبانده ميشوند، اين روش داراي درجه اطمينان بالايي از نظر يكنواختي مواد و كنترل كيفيت ميباشد. روش دستي داراي كاربرد بيشتري است, در اين روش ابتدا رزين را به سطح بتن كشيده، سپس لايه فيبري را به وسيله غلتك به سطح بتن ميچسبانند. اين

۲-Unstressed Soffit Plates

^r-Prestressed Soffit Plates

 $\ -Pultrusion$

فرایند پلتروژن: با این روش لمینیت ها یا ورقهای پوشـشـی با مقطع عرضـی و طول معین ساخته می شود در این روش حین کشیدن نوار فیبر رزین یا ماتریس که معمولاً از پلی اسـتر یا وینیل اسـتر می باشـد با گرمای الکتریکی به کمک روغن داغ به فیبر اضـافه می شـود و اتاقک پیش گرمایشـی فرکانس رادیویی کنترل کننده ضخامت در زمان عمل آوری می باشد.

روش به ناصافي سطح بتن حساس بوده واين ناصافيها سبب عدم پيوند مناسب FRP و جدايي ورق از بتن ميگردد. روش تزريق چسب نيز خصوصياتي مشابه با روش دستساز دارد, ولي كاربرد آن محدود است[7].

2-2-3- ورقهاي پيشتنيده زيرين

ورق هاي FRP با فرايند پلتروژن را ميتوان به صورت پيشتنيده به تير بتن آرمه متصل كرد. مهمترين مزيت استفاده از ورق هاي پيشتنيده افزايش ظرفيت باربري سازه قبل از وارد شدن بار به آن است, كه سبب كاهش عرض ترك ها مي شود. و از آن جاييكه مقاومت كششي FRP بالا است, پيشتنيدگي منجر به كاربرد مؤثر تر آن مي گردد. پيشتنيدگي نسبت به پارامتر كار گر حساس بوده و نياز مند دقت بخصوصي جهت طراحي و نصب سيستم مهاريي انتهايي است [7].

3-3- مدهاي گسيختگي در تيرهاي بتنآرمه تقويت شده با تركيبات FRP در خمش

FRP عسيختكي ناشي از پاركي ورقه

از آنجاييكه شكست ناشي از پاره شدن پليمر هاي اليافي, پس از تسليم آرماتور هاي طولي رخ ميدهد, اين نوع شكست نرم و مطلوب بوده و از حداكثر ظرفيت خمشي تير استفاده مي شود [7].

شكل**3-3- پ**ارگي ورقه FRP [7]





Mid-span

تیر مقاوم شده با ورق FRP

2-3-3 كسيختكي ناشي از خردشدكي بتن ناحيه فشاري

اين مد به دليل خرد شدن بنن ناحيه فشاري بسيار ترد است. توجه شود كه گاهي بر اثر تقويت خمشي, تير دچار گسيختگي ترد برشي ميشود كه بايستي با تقويت تو أم برشي و خمشي از ايجاد اين مد ناگهاني جلوگيري نمود[7].



شكل**3-5-** خردشدگي بتن فشاري [**7**]

3-3-3 گسیختگي ناشي از عدم پیوند جداشدگي) انتهاي ورق

اين نوع گسيختگي زودرس بوده و مانع رسيدن تير به ظرفيت خمشي نهايي خود ميشود. در اين نوع گسيختگي, ورق در انتهاي تير از سطح بتن جدا ميشود. كه ميتواند با مد گسيختگي ناشي از جدا شدگي پوشش بتن تركيب شود**[7].**



شكل**6-3-** جدايش ورقه FRP در انتهاي ورقه[8]

3-3-4- جدا شدگي پوشش بتن در سطوح كششي يا برشي

اين گسيختگي بر اثر بهوجود آمدن ترك در محل يا نزديكي انتهاي ورق به علت بالا بودن تنشهاي برشي ونرمال و همچنين قطع ناگهاني ورق در اين محل رخ ميدهد. اين تركها در سطح كششي به صورت افقي و در راستاي فولادهاي كششي انتشار مييابند و سبب جداشدن پوشش بتني ميگردند[7].



شكل**7-3-** جدا شدكي پوشش بتن [7]

3-3-3- عدم پيوند سطح مشترك انتهاي ورق

عدم پيوند مناسب بين چسب وتير , كه از انتهاي ورق توسعه مييابد, دليل ايجادچنين مد گسيختگي

است. پاسخ بار -تغيير مكان اين مد مانند مد گسيختگي ناشي از جدايش پوشش بنني است. تحقيقات نشان ميدهد اين نوع گسيختگي به دليل بالا بودن تنش برشي و نرمال انتهاي ورق يا در نزديكي آن ايجاد ميشود. با ظهور اين نوع گسيختگي, سيستم FRP از سطح بتن, با يك لايه نازك از بتن چسبيده به آن جدا ميشود. خطر از بين رفتن پيوند سطح مشترك, ميتواند در اثر نامر غوب بودن چسب و ناهمواري سطح بتن تشديد شود [7].



شكل8-8- عدم پيوند درون وجهي انتهاي ورق [7]

3-3-6- كسيختكى ناشى از تركهاي وسطربه انضمام عدم پيوند سطح مشترك

گسيختگي پيوندي, ممكن است در اثر ترك خمشي يا تركيب ترك خمشي- برشي در فاصلهاي دورتر از انتهاي ورق شروع شده و به سمت انتهاي نزديكتر توسعه يابد. اين نوع گسيختگي غالباً در بتن مجاور چسب رخ ميدهد و ميتواند به دو شكل گسيختگي ناشي از ترك خمشي مياني به انضمام عدم پيوند سطح مشترك و يا گسيختگي ناشي از ترك خمشي- برشي مياني به همراه جدا شدن سطح مشترك رخ دهد. اين نوع گسيختگي در تير هاي سطحي و غير عميق بيشتر از گسيختگي انتهايي ورق رايج است [7].



شكل3-9- كسيختكي ناشي از ترك هاي وسط به همر اه جدا شدن سطح مشترك[7]

3-3-6-1- كسيختكي ناشي از ترك خمشي مياني به همراه ازبين رفتن چسبندكي سطح مشترك

به دنبال ايجاد ترك خمشي اصلي در بتن, تنشهاي كششي حمل شده توسط آن به ورق FRP منتقل مي شود. به عبارت ديگر تنش كششي سطح مشترك بين بتن و ورق FRP, در نزديكي محل ترك به طور ناگهاني افزايش مييابد. با رسيدن اين تنشها به مقدار بحراني، عدم پيوند وچسبندگي در محل ترك آغاز شده و به سمت انتهاي نزديك گسترش مييابد [7].



شكلFRP - كسيختكي عدم بيوند ايجاد شده در ورقه FRP در اثرترك هاي خمشي [8]

3-3-3-2 كسيختكي ناشي از ترك خمشي برشي مياني به همراه جدا شدن سطح مشترك

عريض شدن ترك, يك نيروي محرك براي افزايش عدم پيوند وچسبندگي است. كه در اين حالت، فاصله عمودي بين دوسطح ترك, توليد تنش غشايي روي ورق FRP نموده كه به لايه دروني بتن نيز گسترش مييابد. از نظر محققان عريض شدن ترك در اين مد گسيختگي, مهمتر از اثر جابجايي دو سطح ترك بر روي يكديگر است[7].

4-3- مقاوم سازي برشي تيرها

شكست خشي و برشي دو مد شكست اصلي در تيرهاي بتنآرمه هستند, كه شكست خمشي به علت شكلپذير بودن به عنوان مد شكست حاكم، به شكست برشي ترجيح داده ميشود. شكست نرم (شكل پذير) اجازه باز توزيع تنش را داده و با بروز علائم هشدار دهنده اين امكان را ميدهد كه قبل از فروريختگي, اقدامات لازم به عمل آيد. حال آنكه شكست برشي ترد بوده و ممكن است, سريع و بدون هيچ زنگ خطري رخ دهد. بنابر اين انتخاب روشي مناسب براي تعمير و مقاومسازي ساز ههاي دچار نقص برشي بسيار حائز اهميت است. نقص برشي ميتواند تحت هر يك از عوامل افز ايش در وزن بار مجاز ، زوال ناشي از فرسودگي، قرار گرفتن در معرض عوامل محيطي، نارسايي پا كمبود تقويتهاي برشي، خور دگي تقويتهاي برشي و ... رخ دهد. به طور نمونه را محلهايي كه براي اين نوع نارسايي وجود دارد ميتواند شمال محدود كردن بار هاي وارده، جايگزيني همه و يا قسمتي از اعضاي سازه و مقاومسازي اعضا اصلي باشد. محدود كردن بار ها يك روش موقتي بوده و نميتواند به صورت زيربنايي به حل اين مشكل بپردازد. جايگزيني اعضا سازه نيز بسيار مشكل و پر هزينه است و گاهي به دليل اهميت تاريخي – فرهنگي و ارزشهاي معماري برخي بناها چنين كاري مقبول نيست و فظر زماني كه سازه به سطحي از زوال ميرست زي بيز ممكن است, استفاده از آن اجتناب خاپذير ميباشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتناب خاپذير ميباشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتناب خاپذير ميباشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتناب خاپذير ميباشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتناب خاپذير ميباشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي مركن اين ممكن است, استفاده از آن احتناب خاپز روش مقاومسازي براي ميني تيري استفاده از صفحات فازي براي معاومسازي برشي تير هاي بينآر مه به عنوان يك روش موثر براي بهبود كار آيي سازههاي بنتي تأييد شده است. اما مشكلات مربوط به آمادهسازي، حمل و نقل و نصب آنها و همچنين امكان خور دگي اين صفحات نياز به وراد آم ميرار اما شميكار

نتايج آزمايشگاهي و مدلهاي تحليلي ثابت كردهاند كه استفاده از تركيبات مختلف FRP ميتواند ظرفيت برشي نيرها را به طور قابل ملاحظهاي افزايش دهد. به منظور افزايش ظرفيت برشي تير, ميتوان صفحات FRP را در الگوهاي مختلف دورپيچ كامل، نصب در دو سطح جانبي تير و يا به صورت پوشش U شكل به جان تير متصل نمود. براي اين منظور ميتوان از الگوي يكپارچه ورق يا Laminate و نوارهاي منقطع يا strips استفاده كرد**[10].** براي درك بهتر نحوه مقاومسازي برشي نيرهاي بتنآرمه، پديده تركخوردكي، مدهاي كسيختكي و نقش آرماتورهاي برشي، مطالعه رفتار تيرهاي بتني تحت برش و تعيين عوامل موثر در رفتار و ظرفيت برشي ضروري است, كه در ادامه به آن پرداخته ميشود.

5-3- بررسي رفتار برشي تيرهاي بتني

1-5-3- تركهاي برشي و عوامل مؤثر در رفتار اعضاء بتنآرمه تحت برش

تنشهاي كششي در تيرها تنها محدود به تنشهاي خمشي نيستند. بلكه اين تنشها با شدتها و زواياي تمايل مختلف در تمام نقاط تير وجود دارند. اين تنشهاي كششي را اصطلاحاً تنشهاي كششي قطري يا تنشهاي كششي مايل ميگويند. با افزايش بار، تنشهاي برشي و در نتيجه تنشهاي كششي قطري افزايش مييابند. در اين شرايط مقطع در امتداد صفحهاي كه تنش كششي مربوط به آن به مقاومت كششي بتن رسيده است ترك ميخورد. چنين تركهايي را اصطلاحاً تركهاي قطري يا مايل ميناد، تركهاي قطري به دو صورت ممكن است به وجود آيند[11]:

- ترك برش در جان كه تركهاي كشش قطري تحت زاويه **45** درجه در محل صفحة خنثي هستند و هنگامي رخ ميدهند كه تنشهاي خمشي ناچيز باشند.



شکل-111- ترک برش در جان[11]

- تركهاي خمشي – برشي كه هرگاه در يك ناحيه از تير هر دو مقدار لنگر خمشي و نيروي برشي زياد باشد, اين مكانيزم ترك به وجود ميآيد. در اين مواقع ابتدا تركهاي خمشي در نواحي تحت كشش ايجاد شده سپس در جهت افقي متمايل شده و توسعه مييابد[11].



شكل12-31- ترك خمش- برش [11]

پس از ترك خوردن، انتقال برش در عضو بتني توسط تركيبي از مكانيزمهاي زير صورت ميگيرد[11].

 V_{cz} مقاومت برشي بتن ترك نخورده **-1**

 V_a نيروي ناشي از درگير بودن دانههاي سنگي. ${f 3}$

 V_d عمل برش آرماتور هاي طولي3

 V_{s} مقاومت برشي تامين شده توسط آرماتور هاي برشي 4



شكل3-13- مكانيزم انتقال برش پس از ايجاد ترك برشي [11]

نتایج آزمایش ها نشان دادهاند که نسبت دهانه برشي, a, به عمق مؤثر, d, تأثیر اساسي بر مقاومت برشي مقطع ترك خورده دارد و عامل غالب مؤثر بر رفتار برشی است.

مك گرگور⁷ تيرها را به 4 نوع بر اساس نسبت
$$\frac{a}{d}$$
 تقسيم كرد[12]:
1-تيرهاي عميق با نسبت $\frac{a}{d}$ كوچكتر از يك.
2-تيرهاي كوتاه با نسبت $\frac{a}{d}$ بين 1 تا 2/5.
2-تيرهاي معمولي با نسبت $\frac{a}{d}$ بين 2/5 تا 6.
3-تيرهاي بلند با نسبت $\frac{a}{d}$ بين 3/2 قا 6.

تيرهاي عميق**1>** $\frac{a}{d}$: در اين حالت پس از ايجاد ترك قطري، تير مانند يك قوس مهار شده عمل ميكند(شكل(**5-3)),** كه در آن بار وارده به وسيله فشار مستقيم در سراسر ناحيه هاشورخورده و كشش در آرماتور طولي, انتقال مييابد و بدين ترتيب با بازتوزيع نيروهاي برشي در مقطع, قطعه همچنان به مقاومت در مقابل برش ادامه ميدهد.

v-Macgregor 1988



شكل**3-14-** عمل قوسي [11]

گسيختگي در چنين تيرهايي به صور مختلف رخ ميدهد كه عبارتند از **[11]:**

لغزش(يا زوال چسبندگي) آرماتور كششي در بتن، خرد شدن عضو در محل تكيهگاه, گسيختگي خمشي ناشي از خرد شدن بتن بالاي قوس يا تسليم شدن آرماتور كششي و گسيختگي بدنه قوس در اثر خروج از مركزيت نيروي فشاري در قوس كه در اثر آن يا ترك كششي در تكيهگاه ايجاد ميشود و يا بتن در قسمت تحتاني بدنه قوس خرد ميشود.



شكل 15-34- حالات مختلف گسيختگي در تير هاي عميق [11]

تير هاي كوتاه 2/5 > $\frac{a}{d}$ >1: پس از ايجاد ترك خمشي – برشي، با افزايش بيشتر بار, ترك به ناحية فشاري نفوذ ميكند و به صورت يك ترك ثانويه به سمت آرماتور كششي انتشار مييابد و در امتداد آن پيش ميرود. سر انجام گسيختگي به يكي از دو صورت زير رخ ميدهد[11]:

- لغزش آرماتور كششي در بتن گسيختگي برشي-كششي)

- خرد شدن بتن نزديك وجه فشاري كسيختكي برشي- فشاري)



شكل-16-3- حالات مختلف گسيختگي در تير هاي كوتاه[11]

تير هاي معمولي با دهانه متوسط **6** < **2/5:** در اين تير ها ابتدا تركهاي خمشي قائم ايجاد ميشوند و به دنبال آن تركهاي خمشي – برشي به وجود ميآيند.



شكل17-3- كسيختكي ناشي از كشش قطري در تير هاي با دهانه متوسط[11]

تير هاي بلند **6 > ^a**: در اين تير ها اصولاً گسيختگي تنها ناشي از خمش است و به ندرت ترك هاي خمشي – برشي به d - *d* وجود ميآيند.

بار محوري نيز ميټواند تاثير قابل توجهي بر مقاومت برشي اعضاء بتنآرمه داشته باشد. اين بارها ممکن است در اثر بارهاي خارجي، افت و حرارت و يا نيروهاي پيشتنيدگي به وجود آيند.

نيروي فشاري، تنشهاي كششي را كاهش ميدهد و در نتيجه تمايل به ايجاد ترك قطري كاهش مييابد و بر عكس وجود نيروي كششي سبب افزايش تنشهاي كششي و تمايل بيشتر به ترك خوردن ميشود[11].

2-5-3- نقش آرماتور برشي در رفتار تيرها

اساس فلسفة آيين نامه ACI در مسلح كردن اعضا بتني براي برش، جلوگيري از رشد تركهاي مايل و افزايش شكلپذيري سازه ميباشد. بنابراين در مواردي كه پيشبيني ميشود ترك قطري در مقطع به وجود ميآيد و براي جلوگيري از شكست ترد و اتفاقي بايد اقدام به مسلح كردن مقطع با خاموت نمود. به خصوص در مواردي كه عضو در معرض نيروهاي برش غير منتظره ناشي از نشست، زلزله و ... باشد[11].

6-3- روش هاي سنتي مقاومسازي برشي

روشهاي متداول تقويت براي بالا بردن ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه عبارتند از [13].

1-نصب ورق هاي فو لادي

3-استفاده از خاموت هاي خارجي و

1-6-3- اتصال ورق های فولادی

اتصال ورقهاي فولادي به جان تير با استفاده از مهار مناسب يكي از معمولترين روشهاي مورد استفاده براي تقويت برشي تيرهاي بتنآرمه است. هر چند اين روش ظرفيت برشي تير را افزايش ميدهد اما داراي معايبي است كه عبارتند از **[13]:**

1- كنترل بار هنگام نصب ورقهها (مانند كنترل ترافيك در تقويت تير پلها)

3- افزايش وزن مرده سازه
3- نياز به تجهيزات دقيق براي قرار دادن ورق ها در محل
4- نياز به مهار مناسب انتهاي صفحات
5- دشواري تغيير شكل ورق هاي فو لادي در مقاطع پيچيده
6- بالا رفتن هزينه نگهداري به خاطر خوردگي ورق هاي فو لادي و
ميتوان براي حل مشكل مهاربندي، از چسب براي اتصال ورق هاي فو لادي استفاده نمود.

2-6-3 استفاده از خاموت هاي خارجي

براي كمكردن نارسايي برشي در تيرهاي بتنآرمه ميتوان از خاموتهاي فلزي خارجي استفاده نمود. اين خاموتها ميتوانند بدون پوشش در سطح بتن استفاده شوند, كه به علت قرار گرفتن در معرض عوامل بيروني ممكن است بهسر عت خورده شوند, به خصوص در پلها به دليل استفاده از نمكهاي ضديخ براي ذوب كردن برف و يخ، خوردگي تسريع ميشود. براي محافظت اين خاموتها ميتوان از پوشش بتن استفاده نمود, كه در اين صورت بار مرده اضافه عمدهاي به سازه تحميل ميشود[13].

بايستي يادآور شد كه روشهاي ذكر شده در بالا تنها رامحلهاي موجود نبوده و فقط نمونهاي از روشهايي هستند كه با هزينههاي مناسب و تكنيك نسبتاً ساده, قابل اجرا ميباشند.

7-3- استفاده از صفحات FRP براي مقاومسازي برشي

گرايش روزافزون به استفاده از سيستمهاي FRP براي مقاومسازي برشي دلايل گوناگوني دارد. مواد FRP مقاومت زيادي در برابر محيطهاي خورنده دارند، به سهولت و بدون نياز به تجهيزات بر روي تير نصب ميشوند اين سيستمها همچنين ميتوانند, در سطوحي با دسترسيهاي محدود يا جاهايي كه اجراي شيوههاي متعارف با مشكلاتي مواجه هستند, مورد استفاده قرار بگيرند. با اشاره به اينكه عمر خدمت آنها ميتواند مشابه تقويتهاي داخلي باشد[**14**].

8-3- پارامترهاي مؤثر در تقويت برشي تيرها با ورقه FRP

مقاومت برشي اضافي تأمينشده توسط FRP به عوامل زيادي بستگي دارد, كه ميتوان آنها را به دو گروه خصوصيات مربوط به FRP و چسب و خصوصيات عضو بتني تقسيمبندي نمود.

1-8-3 و چسب FRP و چسب

- ۔ شکل و الگوي تقويت ۔ مقدار و نوع FRP
- جهت قرار گیری الیاف با محور عضو
 - _ تعداد لايههاي ورقه FRP
 - تنش و كرنش نهايي FRP
 - ۔ تنش بر شي چسب
 - طول چسبندگي ورقه FRP

_ ضخامت ورقه FRP

2-8-3- خصوصيات عضو بتني:

۳-۹- مرور و تلفیق پارامترهای مطالعه شده

همانطور كه در مبحث قبل بيان شد, پارامتر هاي متعددي بر رفتار اعضاء بتن آرمه مقاوم شده با ورقهايFRP موثر هستند كه پيچيدگي موضوع و ماهيت تحقيقي مطالعات آزمايشي را نشان ميدهند. در جدول 1 خلاصه جزئيات آزمايشهاي انجام شده در ارتباط با موضوع آورده شده است. از جدول مطالب زير را ميتوان استنباط نمود.

1- بيشتر پارامتر هاي مطالعه شده در ارتباط با خواص FRP هستند و مطالعه پارامتر هاي ديگر موثر در مكانيز م مقاومت برشي نظير اثر تقويت هاي برشي فو لادي محدود مي باشند.

2- پر اکندگي پار امتر هاي مطالعه شده بسيار زياد است که باعث سخت ر شدن تفسير نتايج مي شود

			خواص و پارامتر ها																					
			هندسه				نوع تير		بتن و فولاد			نوعFR P			الكوي مقاومسازي									
محق	سال	تعداد أزمايش	مقطء مستطنا	. K.î. ⊤ • Lő.	المائم س1–11 المالية ال	2mrl-1m nieilas	د هايه شه معالم ا	" (1/4/2 EV 100000000000000000000000000000000000	in ala ris	ات مقالين	تىن تى أكر خميادم	بانتار شام ماقم	lab calar Slice	مناكي دهامي عدخن	500 S	آد امدر	4 1911 P	الم المحمد محمد محمد محمد محمد محمد محمد محمد	, K å⊔	æ11 1 a Ì	11.00 11.00	به با من	، مع میں شیبین میں ا	
Berset	1992	2																						
Uji	1992	4																						
Al-Sulimani	1994	2																						
Chajes	1995	4																						
Sato	1996	4																						
Miyauchi	1996	3																						
Taerwe	1997	4																						
Sato	1997	2																						
Umezu	1997	15																						

جدول **1-3-** خلاصه تحقيقات انجام شده روي مقاومسازي برشي با FRP [21]

Funakawa	1997	3											
Araki	1997	8											
Ono	1997	5											
Taljesten	1997	3											
Chaallal	1998	4											
Mitsui	1998	6											
Triantafillou	1998	9											
Khalifa	1999	2											
Khalifa	2000	4											
Kachlakev	2000	1											
Deniaud	2001	9											
Li	2001	4											
Khalifa	2002	4											
Pellegrino	2002	9											
Chaallal	2002	20											

10-3- بررسي پارمترهاي مختلف در تقويت برشي تيرهاي بتنآرمه با ورقه FRP

1-10-3- شكل و الكوي تقويت

به منظور افزايش ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه با تركيبات FRP، صفحات FRP بايد به وجوه جانبي تير متصل شوند. تعيين الگوي تقويت, شامل تعيين شكل ورقه اي يا نواري) ساختار و موقعيت و جهت FRP ميباشد. در شكل زير نمونههاي پيچيدن FRP براي افزايش مقاومت برشي تير نشان داده شده است كه عبارتند از: پيچيدن كامل سيستم FRP به دور مقطع، نصب FRP بر روي سه وجه تير به صورت پوشش U شكل و نصب FRP روي دو وجه جانبي تير [13].



شكل18-3 براي المونه هاي مختلف پيچيدن FRP براي افزايش مقاومت برشي تير [15]

اگر چه هر سه تكنيك ذكر شده در بهبود مقاومت برشي تير هاي بتن آرمه مؤثر ند, اما استفاده از الگوي a پوشش دور تا دور) موفق تري**ن** الگوي تقويتي در اين زمينه مي باشد. ولي به دليل عدم دسترسي كامل به تمام وجوه تير امكان اجراي آن بسيار كم است. استفاده از پوشش هاي U شكل روشي عملي براي افز ايش مقاومت برشي مقاطع بتن آرمه مي باشد, ولي عمدتاً در نواحي با لنگر مثبت مؤثر است. چرا كه در نواحى با لنگر منفى معمولاً ترك هاي اوليه در نزديكي دال بتني رخ داده و اين الكوي تقويتي قادر به كنترل و جلوگيري از گسترش تركهاي اوليه نيست.

در همه نمونهها FRP مىتواند به صورت ممتد در امتداد طول دهانه عضو يا به صورت نوارهاي مجزا قرار بگيرد. استفاده از نوارهاي مجزا امكان تبخير بهتر آب و عمل آوري بتن و همچنين مصرف كمتر FRP را فراهم ميسازد ولي از لحاظ اجرایی بسیار پرزحمت است, از طرفی امکان مد گسیختگی پیوندی و عدم چسبندگی در این حالت بیشتر میباشد. مزیت استفاده از الگوي يکپارچه علاوه بر سهولت کاربرد آن در محل, تأثير آن در محافظت نير در برابر عوامل جوي است[15].



شكل-19- الكوي يكپارچه و منقطع [13]

نوارها و ورقههاي FRP ميتوانند در زواياي مختلف, به خصوص **45** درجه براي کنترل تركهاي برشـي و در تعداد و لايههاي مختلف به طور نمونه در دو لايه عمود بر هم با زاويههاي متفاوت, نظير **0-90** درجه يا **45** ± درجه به كار برده شوند[13].



ب**۔ °90**

شكل**20-3- ج**هت فيبر هاي FRP [**15**]



شكل**3-21-** جهت فيبر هاي چندگانه FRP [**15**]

الف

به طور كلي ميتوان از نوار هاي تقويت در جهات مختلف و يا در حالت يكپارچه از جهت الياف اصلي متغير استفاده نمود.



شكل22-3- الكوهاي مختلف تقويت برشي تير با ورقهFRP [16]



2-10-3- مقدار ونوع FRP

استفاده از ورق هاي با الياف كربن (CFRP) و ورق هاي با الياف شيشه (GFRP) تأثير متفاوتي در تقويت برشي اعضاي بتن آرمه ميگذارند. ورقه GFRP به دليل داشتن مدول الاستيسيته پايين (اندكي بيشتر ازبتن) و تغيير شكل زياد، شكل پذيري عضو را افزايش داده و تأثير اندكي در افزايش مقاومت برشي دارد. در حالي كه ورق هاي CFRP به دليل داشتن مدول الاستيسيته بالا (بيشتر از فولاد) و تغيير شكل نهايي كم داراي رفتار ترد با شكل پذيري كم و مقاومت برشي تقويتي بالا است (شكل (3-20))



شكل CFRP مقايسه رفتار CFRP و GFRF [15]

3-10-3 جهت الياف با محور عضو

به دليل مقاومت زياد صفحات و نوارهاي FRP در جهت الياف, بايد راستاي قرار گرفتن الياف به صورتي باشد كه حداكثر بهرموري از مصالح, در جهت كنترل عرض تركخوردگي برشي وجود داشته باشد. همچنين جهت نيروهاي برشي در يك تير ممكن است به دليل وقوع زلزله يا ساير بارهاي رفت و برگشتي معكوس شود, بنابراين گاهي لازم است كه الياف در دو جهت متفاوت كه متناسب با ترك*ه اي برشي ز اشي از بارگ ذار چسد يك لي باشد, است فا د مشود. ال جته استفاد ه ازال ياف بدين صورت حتي د رشراي طي كه بروه اي برشي معكوس هم وار د نشون د, مغيد است [18].*

همانطور كه قبلاً نيز بدان اشاره شد, عموم تركهاي برشي تحت زاويه **45** درجه ايجاد ميشوند. لذا استفاده از الياف در جهت عمود بر زاويه تركخوردگي **(45** درجه**)** باعث افزايش تأثير تقويت برشي ميشود.

4-10-3- تعداد لايه هاي FRP

به طوركلي ميتوان گفت, با افزايش تعداد لايه ها تقويت بيشتري صورت ميگيرد. ولي با افزودن هر لايه تأثير لايه جديد در افزايش مقاومت برشي كاهش مييابد[**19].**

در مدل اجزاي محدود از آنجاييكه پيوند بين بتن و ورقه FRP, همچنين پيوند بين لايههاي مختلف, كامل درنظر گرفته ميشود و فرض بر اين است كه چسب اپوكسي پيوندي قويتر از پيوند بتن و ورقه FRP دارد, لذا تأثير تعداد لايهها را ميتوان در ضخامت لايه FRP بررسي نمود.

FRP- تنش برشى چسب و طول چسبندگى ورقه

چسبها براي اتصال لايههاي پيشعمل آوري شده FRP به سطح بتن به كار برده مي شوند. اين مواد مسيري براي انتقال بار بين سطح بتن زيرين و لايه مسلح FRP ايجاد ميكنند. لذا بايد خواص زير در توليد آن مورد توجه قرار بگيرند, تا نقش مؤثرتري در مقاومسازي و مرمت اعضاي سازهاي داشته باشند[**19].**

ميشود. افزايش طول چسبندگي نيز باعث جلوگيري از گسيختگي هاي موضعي ناپيوندي و در نتيجه رسيدن به ظرفيت مورد نياز تقويت FRP در مقاومسازي برشي تير ميگردد. اما افزايش بيشتر طول چسبندگي تا زماني مؤثر است که بيشتر از طول مؤثر گيرايي آن نشود[**19].**

همان طور كه گفته شد به دليل مقاومت بالاي چسبندگي چسب از تأثير آن در اكثر تحقيقات با مدل اجزاي محدود صـرف نظر شده و اثر چسب و طول چسبندگي صـرفاً در روابط تئوري ارائه شده براي مسأله گسيختگي ناپيوندي بررسي ميشود. كه در اين روابط براي سادگي، رفتار چسب خطي فرض شده است.

6-10-3- ضخامت ورقه FRP

به طور كلي مدهاي گسيختگي تير بتنآرمه تقويت شده با ورقه FRP با توجه به اثر ضخامت ورق را ميتوان به صورت زير طبقهبندي نمود[**20**].

1- تسليم آرماتور كششي و به دنبال آن پارگي ورق FRP (گسيختگي FRP)
 3- تسليم آرماتور كششي و به دنبال آن خرد شدن بتن ناحيه فشاري شكست كششي)
 3- خردشدگي بتن قبل از تسليم آرماتور كششي شكست فشاري)

دو مد گسيختگي اول و دوم نرم بوده و با اخطار قبلي همراه هستند, اما مد گسيختگي سوم ترد و ناگهاني است. بنابراين ضخامت ورق FRP بايد به گونهاي انتخاب شود كه گسيختگي از نوع گسيختگي FRP و يا شكست كششي باشد. در گسيختگي از نوع اول نيز به اين دليل كه FRP قبل از رسيدن به مقاومت نهايي خودگسيخته ميشود, لذا گسيختگي مطلوب را از نوع گسيختگي دوم در نظر ميگيرند.

با توجه به شـكل **(26-3)** اگر ضـخامت ورقه يا لايه FRP از $t_{f,\min}$ كمتر باشد ناحيه **1)** ، مد گسيختگي از نوع گسيختگي FRP. و اگر ضخامت بين $t_{f,\min}$ و $t_{f,\min}$ باشد ناحيه **2)** ، مد گسيختگي از نوع شكست برشي است. اما اگر ضخامت ورقه يا لايه FRP از $t_{f,\max}$ بيشتر باشد ناحيه **3)**، گسيختگي ترد و ناگهاني روي ميدهد. بنابراين براي جلوگيري از شكست ترد خردشدگي بتن قبل از تسليم آرماتور كششي بايد مقدار $t_{f,ty}$ كمتر از $t_{f,max} = 0.75t_{f,ty}$ در نظر گرفته شود.



Thickness of web-bonded FRP, t_f

شكلFRP و مد كسيختكي [17] و مد كسيختكي [17]

(t_{f.min}) د مینه (-10-3 مینه (

جهت تعيين ضخامت t_{f,min} فرضيات زير نظر گرفته ميشود[**20]:**

سازگاري کرنش فولاد, بتن و کامپوزيت.

باقي ماندن صفحات به صورت صفحه در خمش (اصل برنولي).

صرف نظر كردن از مقاومت كششي بتن, مقاومت چسب و مقاومت فشاري FRP براي سادگي مسأله.





با استفادهاز تشابه مثلثها ميتوان نوشت:

$$c = \frac{\mathcal{E}_{cu}}{\mathcal{E}_{cu} + \mathcal{E}_{fr}} h \tag{1-7}$$

و c فاصله تارنهايي بتن تا محور خنثي مي جه جه جه و جه جه و جه جه و جه جه و جن ما مع تير جن بين تا محور خنثي مي باشد.

$$c = \eta_3 h \tag{Y-T}$$

$$\eta_3 = \frac{\mathcal{E}_{cu}}{\mathcal{E}_{cu} + \mathcal{E}_{fr} + \mathcal{E}_{f_0}} \tag{(7-7)}$$

با تعيين ₆ كرنش اوليه كششي بتن در تار انتهايي تير تحت اثر بار هاي بهره برداري قبل از تقويت Saadatmanesh) (Malek,1998) مي توان ₆ را با استفاده از رابطه زير تعيين نمود[**20**].

$$\mathcal{E}_{c_0} = \frac{M_{\circ}c_{\circ}}{E_c I_{cr_0}} \qquad \qquad (^{\mathfrak{p}} \cdot \mathbf{r}) \qquad \Rightarrow \qquad \mathcal{E}_{f_0} = \mathcal{E}_{c_0} \left(\frac{h - c_{\circ}}{c_{\circ}}\right) \qquad (^{\mathfrak{d}} \cdot \mathbf{r})$$

ر ارتفاع تا تار خنثي, E_c , مدول الاستيسيته بتن و I_{cr_0} , ممان اينرسي مقطع ترك خورده بتني ميباشد [20]. c_{\circ}

تنش درون ورقه FRP :

$$f_f = E_f(\varepsilon_f - \varepsilon_{f_\circ})$$
 (۶-۳)
کرنش در آرماتور فشاري :

$$\varepsilon'_{s} = \varepsilon_{cu} \left(1 - \left(\frac{d'}{\eta_{3} h} \right) \right) \le \varepsilon_{y} \tag{V-T}$$

با نوشتن معادله تعادل براي مقطع تير داريم :

$$0.85f_c'\beta_1 bc + A_s'\varepsilon_s'E_s - A_sf_y = f_{fr}t_{f,\min}(h-c)$$
(A-7)

$$\Rightarrow t_{f,\min} = \frac{0.85 f_c' \beta_1 \eta_3 bh + A_s' \varepsilon_s' E_s - A_s f_y}{f_{fr} h(1 - \eta_3)}$$
(9-7)

بار امتر تبديل بلوک تنش به صورت يکنواخت و مستطيلي بلوک تنش ويتني مي باشد . eta_1

(t_{f,ty}) بدست آوردن ضخامت در زمان تسليم آرماتور كششي (t_{f,ty})





با نوشتن روابط تعادل داريم[20]:

$$\eta_1 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}} \tag{1.-7}$$

1۔ اگر آرماتور فشاري تسليم شود:

$$t_{f,ty} = \frac{0.85 f_c' b d\beta_1 \eta_1 + A_s' f_y - A_s f_y}{E_f (\varepsilon_{cu} \frac{h - \eta_1 d}{\eta_1 d} - \varepsilon_{f_o})(h - \eta_1 d)}$$
(11-7)

2- اگر آرماتور فشاري تسليم نشود:

$$t_{f,ty} = \frac{0.85f_c'bd\beta_1\eta_1 + A_s'E_s(\frac{\eta_1d - d'}{\eta_1d})\varepsilon_{cu} - A_sf_y}{E_f(\varepsilon_{cu}\frac{h - \eta_1d}{\eta_1d} - \varepsilon_{f_s})(h - \eta_1d)}$$
(17-7)

بنا به توصيه ACI داريم :

(17-7)

$$t_{f,\max} = 0.75t_{f,ty}$$

3-6-10-3 بدست آوردن ضخامت در زمان تسليم آرماتور فشاري

1- براي حالت گسيختگي FRP [**20**]

$$t_{f,cy} = \frac{0.85 f_c' \beta_1 cb + A'_s f_y - A_s f_y}{f_{fr} (h - c)}$$
(۱۴-۳) که در آن

$$c = (\varepsilon_{y}h - \varepsilon_{fr}d')/(\varepsilon_{fr} + \varepsilon_{y})$$
(12-7)

2- براي حالت شكست كششي[20]

$$t_{f,cy} = \frac{0.85f_c'\beta_1\eta_2d'b + A_s'f_y - A_sf_y}{E_f(\varepsilon_f - \varepsilon_{f_s})(h - \eta_2d')}$$
(19-7)

$$\eta_2 = \varepsilon_{cu} / (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y) \tag{14-7}$$

$$\varepsilon_{\rm f} = \varepsilon_{\rm cu} (h - \eta_2 d') / \eta_2 d' \tag{14-7}$$

7-10-3- آرايش ونسبت آرماتور طولي

بوسلهام و چالال⁸[21] آزمایش هاي انجام شده توسط محققين مختلف در اين زمينه را مورد بررسي قرار دادند. در تمام اين آزمايش ها جهت جدا كردن اثر ميلكردهاي برشي از اثر FRP از نمونه هاي فاقد ميلكرد برشي استفاده شد. شكل **(29-3)** نمودار تغييرات تقويت نيروي برشي را به عنوان تابعي از نسبت $E_s \rho_{FRP} / E_{FRP} \rho_{FRP}$ براي تير هاي مستطيلي نشان ميدهد. مطابق نمودار با افزايش نسبت $E_s \rho_w / E_{FRP} \rho_w$ نيروي برشي كاهش مي يابد.

الياسيان و همكاران[22] نيز با استفاده از برنامه ANSYS به طور جداگانه به بررسي اثر آرماتور هاي طولي كششي و فشاري در تقويت برشي تير بتني باورقه FRP پرداختند.

با توجه به نمودار به دست آمده ميتوان دريافت كه با افزايش قطر آرماتور طولي كششي, نقش ورقه FRP در تقويت كاهش مييابد. همچنين تسليم آرماتور كششي به تأخير ميافتد. كه اين باعث تغيير مد

شکست خمشی انعطاف پذیر) به مد شکست بر شی می شود.

^{\-}Bousselham and Chaallal



شكل28-3- اثر أرماتور طولي كششي بر تقويت برشي تيرهاي مستطيلي فاقد أرماتور برشي[21]



شكل29-3- نمودار بار- تغيير مكان براي مقادير مختلف آرماتور طولى كششى [22]

با فراهم كردن تقويت فشاري بيشتر در سيستم، بر خلاف قسمت قبل مد شكست، از شكست برشي به شكست خمشي تبديل مي شود. يا به عبارت ديگر با افزايش سطح مقطع آرماتور فشاري، شكل پذيري عضو افزايش مييابد. نتايج به دست آمده (**ج**دول(**2-3))** نشان ميدهد كه با افزايش سطح مقطع آرماتور فشاري، اثر FRP درتقويت افزايش مييابد, اما اين مقدار بسيار ناچيز و قابل صرفنظركردن است.

فشاري	آرماتور	نسبت ت	تنش در نسبت آرماته ب			سهم	تغيير	ممان Kn-m	بار ٺھايي kN	ممان Kn-m	بار ٺهايي kN	
قطر	سطح مقطع mm ²	ارماتور فشاري م	, مليور فشاري تير تقويت شده MPa	$\overline{\rho}_{min}$	$\overline{\rho}_{max}$	FRP در بار نهايي	مكان نهايي mm	تیر کنترل		ت شده	درصد تقویت	
•	•	•	•	•/•19٣	•/•786	٩	10/50	198	304	۱۸.	۳۹۳	11
۲Ф٩	ז/ז ו ע	/••1٧۵	۳۸۹	•/•*11	•/• ٢٥٢	11	۱۸/۴	190	361	۱۸۶	4.1	١٣

جدول2-3- مقایسه اثر مقادیر مختلف آرماتور فشاري در درصد تقویت[22]

φ17 7	۲۲/۲ ۶	•/••٣١	۴	•/•774	•/•190	14	10	104	۳۴۸	١٨٢	397	14
φ ¹ ^γ ۲	۴./۲ ۲	•/••۵9	۳۱۳	•/•749	•/•٢٨٩	۱۳	١٣/٧	10.	34.	144	۳۹۰	10
φ ^γ ·	97/4 1	•/•• • • • •	749	•/•۲٨	•/•٣٢	10	19/90	140	۳۳۷	141	890	١٧
φ٢۵ ۲	۹۸/۸ ۱	•/•189	198	•/•٣٢٩	•/•٣۶٩	10	۱۲/۳	١٣٧	۳۲۹	144	۳۸۸	١٨

8-10-3- آرایش و نسبت آرماتور برشي یا خاموت

طبق بررسيهاي بوسلهام و چالال[21] افزايش در نيروي برشي با افزايش نسبت $E_{s}\rho_{w}/E_{FRP}\rho_{FRP}$ كاهش مييابد. اين نوع رفتار در هر دو مد گسيختگي حاصل از جداشدگي و پاره شدن FRP قابل مشاهده است (شکل (3-31)). چالال، شهاوي و حسن(2002) در همين مورد آزمايشهايي بر روي تيرهاي عميق انجام دادند, که به نتيجهاي مشابه نتايج حاصل از تيرهاي معمولي رسيدند (شکل (3-32)).



شكل30-30- اثر أرماتور طولي برشي بر تقويت برشي تير هاي مستطيلي. الف). پاره شدكي ب) جداشدكي[21]



شكل3--31- اثر آرماتور طولي برشي بر تقويت برشي تيرهاي عميق: پاره شدگي[21]

الياسيان و همكاران[22] نيزمطالعاتي بر روي سه تير با مقادير مختلف آرماتور برشي و در فواصل متفاوت انجام دادند. نتيجه اين مطالعات در جدول (2-3) نشان داده شده است. با توجه به نتايج حاصل ميتوان دريافت كه هر چه نقش آرماتور برشي داخلي افزايش مييابد فواصل خاموت ها كمتر ميشود) نقش ورقه FRP در تقويت برشي كمتر ميشود. به عبارت ديگر ورقه FRP زماني كارآيي مناسب را در تقويت برشي خواهد داشت كه تير داراي ضعف برشي باشد.

_	<i>ه</i> ۱۵	Cm	@٣٠	Cm	@ [¢] ۵ _{cm}				
أرماتور عرضي	جابجايي mm	بار ٺھاي <i>ي</i> kN	جابجايي mm	بار نهايي kN	جابجايي mm	بار نهايي kN			
¢۶	۸/۲۲	474	14/1	478	26/2	47.			
Φ٩	19	4.9	۱۸/۴	4.1	۱۹/۵	4.9			
φι۲	۱۵/۹	4.4	۱۸/۳	417	۱۵/۲	۳۹۸			

جدول3-3- مقایسه اثر مقادیر مختلف آرماتور برشی در درصد تقویت[22]

a/d) تأثير نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر (a/d)

شكل **(3-33)[21**] نمودار تقويت نيروي برشي- نسبت دهانه برشي را نشان مي دهد. سه ناحيه مجزا در نمودار قابل مشاهده است:



شكل32-32- تأثير نسبت دهانه برشى به عمق مؤثر [21]

۱- ناحیه منطبق با a/d کمتر از 2/5 که در آن گسیختگی تحت تأثیر پارگی FRP رخ می هد.

۲- ناحیه منطبق با a/d بزرگتر از 3/2 که گسیختگي با جدا شدن FRP ایجاد مي شود.

٣- ناحیه انتقالي با a/d بزرگتر از 2/5 و کمتر از 3/2 که در آن گسيختگي مي تواند ناشي از پاره شدن و يا
 گسيختگي FRP باشد.

به نظر مي رسد كه سـهم FRP در تيرهاي معمولي از لحاظ افزايش در نيروي برشـي بارزتر از تيرهاي عميق (a/d<**2/5)** باشد.
تأثير مقياس بر تيرهاي بتنآرمه فاقد آرماتورهاي برشي, به دليل ايجاد تركهاي قطري عريض كاملا محرز است (آيين نامه ACI-ASCE 445). اين پديده درمورد تيرهاي RC تقويت شده با FRP نيز مشاهده مي شود. در آزمايش هاي انجام شده در اين مورد نيز جهت جلوگيري از اثر ميلگردهاي برشي از نمونه هاي بدون خاموت استفاده شد. با توجه به شكل (**34-36)** با كاهش عمق موثر به ويژه در عمق موثر كوچكتر از **300**mm كه با جدا شدن FRP گسيختگي مي شوند درصد نيروي برشي افزايش مي يابد [**21]**.



شكل3-33- اثر مقياس در تقويت برشى[21]

FRP مودهاي گسيختگي برشي درتيرهاي تقويت شده با

FRP كسيختكي برشي ناشي از پاركي ورقه

اين نوع گسيختگي اغلب به همراه ايجاد ترك برشي-كششي قطري رخ ميدهد. دربرخي موارد اين ترك مورب ممكن است به صورت ناگهاني ايجاد شود. با عريض شدن ترك قطري, ورق FRP سرانجام به كرنش نهايي خود ميرسد, كه غالباً در انتهاي پايين ترك اتفاق ميافتد. پاره شدنFRP در طول ترك قطري روي سطح بتن, ايجاد شده و سبب گسيختگي كامل تير به صورت ترد ميگردد. عدم پيوند^و نسبي در دوسطح كناري ترك غالباً قبل از گسيختگي FRP اتفاق ميافتد ولي در نهايت گسيختگي در اثر پاره شدن FRP ايجاد ميشود. بنابراين عدم پيوند FRP نميتواند بر ظرفيت برشي اين مد گسيختگي اثر بگذارد. دادههاي آزمايشي موجود ولي محدود نشان ميدهد كه همواره همه تيرهاي دور پيچ شده يا برخي از تيرهاي ژاكت شده U شكل در اين مد قرو ميريزند(شكل(3-33ه)) [23].

1-Debonding

FRP -۱۱-۳ شکست برشی بدون پاره شدن

فرايند شکست در اين مد، مشابه شکست ناشي از پارگي FRP است، به جز اينکه FRP در اين مد گسيخته نميشود.

برخي از نمونههاي مقاوم شده با الياف آراميد در اين مد شكست, گسيخته ميشوند. AFRP به تير هاي شكسته شده اجازه ميدهد تا بار قابل توجهي را حمل كند[23].

FRP - كسيختكي برشي ناشي از عدم چسبندكي ورقه

يك تير بتني تقويت شده در برش ممكن است در اثر از بين رفتن پيوند بين FRP و بتن گسيخته شود در اين حالت. تير به سرعت فرو ميريزد. شكلپذيري تير در اين مد غالباً محدود است. نتايج آزمايش هاي موجود نشان ميدهد كه اكثر تيرهاي تقويت شده با پيوندهاي FRP جانبي و ژاكتهاي U شكل در اين مد فرو ميريزند[**23].**



شكلa -34-3 - 2 كشش برشي همراه با پاره شدن b،FRP- كسيختكي برشي نا شي از عدم پيوند[12]

4-11-3-گسيختگي نزديك مهار مكانيكي

اگر براي مهار FRP در وجوه تيربتن آرمه, از مهار هاي مكانيكي استفاده شود، اين امكان وجود دارد كه در نزديكي محل مهار شده گسيختگي رخ دهد. به طور مثال مهار هاي مكانيكي استفاده شده براي مهار ژاكتهاي U شكل، زير بال تير هاي T شكل ممكن است سبب لايه لايه شدن¹⁰ FRP درمجاورت بال شود[**23**].

شکل(36-33) برخي از نمونههاي گسيختگي برشي درتير هاي تقويت شده با FRP را نشان ميدهد.

\-Delamination



A, Anchorage



R, Fiber rupture



AR, Anchorage and fiber rupture



A+R, Fiber rupture after anchorage failur

شكل3-35- نمونه هاي كسيختكي برشي در تير هاي تقويت شده با FRP [24]

فصل چهارم

چسبندگي بتن و FRP

1-4- پیشگفتار

افزايش ظرفيت باربري و رفتار مطلوب در هنگام شكست تيرهاي بتن مسلح تقويت شده با مواد پليمري اليافي، بستگي به انتقال تنشهاي چسبندگي بين سيستم FRP و تير بتني دارد. انتقال تنش هاي چسبندگي از طريق سه قسمت، پليمر اليافي، چسب و پوشش بتن (لايه بتن بيرون از منطقه محصور شده توسط خاموتها) صورت ميگيرد. افزايش اين تنشها باعث ايجاد شكست, در يكي از اين سه لايه خواهد شد. در بين اين سه ماده، پوشش بتن كمترين مقاومت را داراست، بنابر اين شكست معمولاً در اين ناحيه رخ ميدهد. شكست چسبندگي در لايه چسب به ندرت مشاهده شده است و ميتوان با استفاده از چسب مناسب از وقوع آن جلوگيري كرد.

2-4- تنش چسبندگی برشی

براي ايجاد تعادل در تغييرات تنش محوري صفحات پليمري اليافي، تنش چسبندگي برشي در چسب به وجود ميآيد. اين تنش ها از طريق لايه چسب به بتن منتقل ميشوند. از تعادل يک المان از ورق پليمري اليافي در جهت طولي تير به طول dz مطابق شکل**(1-4)** رابطه زير به دست ميآيد**[25].**

> (۱-۴) در رابطه فوق:

 $\tau = t_{\rm p} \frac{\mathrm{dN}_{\rm p}}{\mathrm{dz}} = t_{\rm p} \mathrm{E}_{\rm p} \frac{\mathrm{d\varepsilon}_{\rm p}}{\mathrm{dz}}$

 N_{p} ، E_{p} ، t_{p} ، r_{p} و e_{p} به ترتيب تنش برشي چسبندگي، ضخامت، مدول الاستيسيته, تنش محوري و كرنش محوري متوسط صفحه RP است.



شكل1-4- تنش برشي چسبندگي در سطح مشترك ورق پليمري اليافي و بتن[25]

3-4- انواع شكست چسبندگي¹¹

در تير هاي تقويتشده در برش, كه پليمر هاي اليافي بر روي دو سطح جانبي تير چسبانده ميشوند, به علت رشد ترك به موازات صفحه پليمري اليافي، در طول سطح مشترك چسب و بتن يا پوشش بتن شكستي رخ ميدهد كه از محل تنش بحراني شروع شده و به سمت انتهاي لايه FRP پيش ميرود. حالت ديگر شكست چسبندگي، شكستي است كه به علت تمركز تنش در انتهاي صفحه پليمري، از انتهاي اين لايه شروع ميشود, اين حالت شكست بيشتر در تيرهاي تقويتشده در خمش مشاهده ميشود. از ديگر شكستهاي چسبندگي ميتوان به شكست در سطح مشترك چسب- بتن، پليمر اليافي- چسب و شكست بتن به همراه جدا شدن لايه FRP اشاره نمود.

4-4- رابطه تنش چسبندكي- لغزش¹²

روابط تنش چسبندگی-لغزش مختلفی توسط محققان برای سطح چسبندگی پلیمر های الیافی با بتن ارائه شده است. در میان این مدلها، مدل الاستیک خطی استفاده شده توسط اپریل و همکاران¹³[26] مطابق شکل**(4-2**الف) و مدل الاستو پلاستیک ارائه شده توسط هومام و همکاران¹⁴[28] مطابق شکل**(4-4**ب), معمولتر هستند.



شكل 2-4- رابطه تنش چسبندگي لغزش در سطح مشترك اتصال پليمر هاي اليافي كربن; الف) الاستوپلاستيك ب) الاستيك خطي [26]

v-Anchorage failure

- r-Bond stress-slip
- r-Aprile et al(2001)

v-Homam et al(2000)

پار امتر هاي استفاده شده در اين مدلها شامل ماكزيمم تنش برشي, au_{max} , لغزش در تنش چسبندگي ماكزيمم، S_{max} ، لغزش نهايي، S_{ult} ، ميباشند. شيب خط در نمودار هاي شكل**(2-4)** مدول لغزش، E_b ، ناميده شده و بر اساس سختي برشي چسب ، G_a ، از رابطه زير به دست ميآيد.

$$E_b = \frac{G_a}{t_a} \qquad , \quad G_a = \frac{E_a}{2(1 - V_a)} \tag{7-4}$$

E_a, E_a و V_a و V_a به ترتيب مدول الاستيسيته، ضخامت و ضريب پواسون لايه چسب مي باشند. با استفاده از آزمايش هاي انجام شده توسط هومام S_{max} τ_{max} و S_{ut} براي پليمر هاي کربني به ترتيب **3/5** مگا پاسکال، 0/01 و 0/5 ميليمتر و براي پليمر هاي شيشه 2/5 مگا پاسکال، 0/01 و 0/67 ميليمتر در نظر گرفته شده است[**26**].

ر ابطه تنش چسبندگي- لغزش خطي الاستيک، بر اي حالتي که شکست در چسب رخ مي دهد، مناسب مي باشد.

اين حالت زماني اتفاق مي افتد كه مقاومت برشي چسب كم باشد. در صورتيكه مقاومت برشي چسب مناسب باشد. به علت كم بودن مقاومت برشي بتن، پوشش بتن از سطح تير جدا ميشود. براي اين نوع شكست مدل الاستيك- پلاستيك جوابهاي بهتري ميدهد.

5-4- تعيين مقاومت برشي چسبندگي در سطح مشترک چسب-بتن و چسب-پليمر اليافي

براي تعيين مقاومت برشي چسبندگي در سطح مشترک چسب-بتن مطابق شکل (4-4) دو مجموعه آزمايش برش-کشش و برش-فشار توسط آردوني و ناني¹⁵[27] انجام شد. ابتدا نمونه هاي بتني منشوري 50*15*15 سانتيمتر ساخته شدند (مقاومت فشاري نمونه ها 30 مگا پاسکال بود). پس از عمل آوري، نمونه هايي با زواياي مختلف شامل زاويه هاي 60 ، 40 ، 20 ، بر لي آزم الحيش کنشري و 70 ، 60 ، 40 ، بر لي آزم الحيش فشد اري مور دبر روسري قرار رگرفت. نر تر لي حي آزمايش ها با توجه به رابطه هاي زير در جدول (4-1) آورده شده است [27].

$$\tau = \frac{F \sin \alpha}{b \times a} \qquad , \quad \sigma = \frac{F \cos \alpha}{b \times a} \tag{(7-4)}$$

در روابط فوق F، نيروي كششي يا فشاري نهايي و a و b به ترتيب طول و عرض سطح چسب ميباشد.



شكل4-3- نمونه هاي آزمايش شده الف)كشش برش،ب)فشار برش[27]

زاە بە بې ش	آزمايش كششي			آزمايش فشاري		
درجه درجه	σ (Mpa)	τ (Mpa)	حالت شكست	σ (Mpa)	τ (Mpa)	حالت شكست
۲.	۳/۱	١/١	شكست بتن	-	-	-
۴.	۲/۱	١/٧	شکست بتن	_Y // 1	۲٣/۶	شکست در سطح مشتر ك

جدول4-1- خواص مكانيكي سطح مشترك بتن - چسب [27]

v-Arduini and Nanni(1997)

۶.	۲/۱	۲/۱	شكست بتن	-11/1	۱۹/۳	شکست در سطح مشترك
٧.	-	-	-	-۴/V	۱۲/۸	شکست در سطح مشتر ك

با استفاده از اعداد به دست آمده در جدول (1-4) و رسم منحني پوش شكست مور كلمب، مقاومت برشي پيوستگي تقريبا بر ابر 5 مگا پاسكال به دست آمد.

مطابق با آز مايش فوق، آز مايشي بر اي پليمر هاي اليافي با همان مواد و هندسه به منظور بررسي خواص سطح مشترک چسب با صفحه پليمري انجام شد. ابتدا دو صفحه پليمري به سطح بتن و سپس دو صفحه به يکديگر چسبانده شدهاند مقاومت برشي در سطح مشترک چسب و صفحات پليمري اليافي، سه بر ابر مقاومت برشي سطح مشترک چسب و بتن به دست آمد.

6-4- طول مهاري مؤثر

كاربردهاي تجربي و تئوريك متعددي براي بررسي مقاومت چسبندگي اتصال پليمر هاي اليافي به بتن مسلح انجام شده است. برخي آزمايشها همانگونه كه در شكل**(4-4)** مشاهده ميشود، آزمايشهاي برشي ساده و مضاعف ميباشند.كار هاي تئوريك انجام يافته, هم به آناليز مكانيزم شكست و هم به مدلسازي بر اساس نتايج و اطلاعات تجربي، با اختياركردن فرضيههاي سادمشونده ميپردازد**[28].**

نيروي كششي در پليمر هاي اليافي در يک طول كوتاه نزديک بار اعمالي، از طريق تنشهاي برشي در چسب به بتن منتقل ميشوند. با افزايش بار ها، توزيع تنش در ناحيه ابتدايي اتصال يكنواخت تر ميگردد. و اين بدان علت است كه هيچ نيرويي از صفحه پليمري به بتن منتقل نميشود. تركها در بتن نزديک بار اعمالي سبب ميشوند, ناحيه چسبندگي فعال به سمت ناحيه جديدي كه از محل اثر بار دورتر است، منتقل گردد. جابهجا شدن ناحيه چسبندگي فعال در هر لحظه به اين معني است كه فقش قسمتي از طول اتصال، مؤثر بوده و نيروي وارد را به بتن منتقل مينمايد.





شكل4-4- آزمايش هاي چسبندگي برشي, الف) آزمايش برشي ساده, ب) آزمايش برشي مضاعف, ج) پلان[28]

نكته قابل توجه در اتصال صفحات تقويتي به بتن اين است كه با هر مقدار افزايش در طول چسبندگي كه در شكل**(4-4)** با L نشان داده شده است. لزوماً به مقاومت چسبندگي اتصال افزوده نخواهد شد. با توجه به اين موضوع مفهوم طول مؤثر چسبندگي مطرح ميشود. اين طول مقداري است كه افزايش بيشتر آن، مقاومت چسبندگي را افزايش نميدهد. البته بايد يادآور شد كه افزايش طول چسبندگي ميتواند شكلپذيري قبل از شكست را افزايش دهد. اين پديده به طور كامل، با رفتار چسبندگي فولاد داخل مقطع متفاوت است. در مورد فولادهاي داخلي، اگر مقدار پوشش بتن كافي باشد، ميلگردهاي طولي براي مقاومت كششي كاملشان طراحي ميشوند[**28].**

7-4- مدل هاي موجود براي مقاومت چسبندگي

در سال**ه اي** اخير، مدلسازيهاي گسٽردهاي در زمينه مقاومت چسبندگي انجام شده است که ميتوان آنها را به سه دسته زير تقسيم نمود:

4-7-1- مدل هاي تجربي
$$t_{x}$$
و وو¹⁶ (1997) $L(cm)$
رابطه ارائه شده تجربی بین طول چسبندگی (L(cm) و متوسط تنش برشی ناشی از چسبندگی, τ_u , و نیز مقاومت چسبندگی نهایی, P_u , توسط هیرویوکی و وو[۲۹] به صورت زیر بیان می شود.
 $\tau_u = 5.88 L^{-0669} Mpa$

$$P_u = \tau_u b_p L \tag{$\Delta-$}$$

17-4-2-1-2- مدل تاناکا¹⁷ (1997)

تاناكا[**28**] رابطه زير را براي تعيين متوسط تنش برشي چسبندگي ارائه نمود.
$$au_u = 6.13 - InL \quad Mp$$

در اين رابطه L بر حسب ميليمتر است. حداكثر مقاومت چسبندگی اتصال يعنی P_u با ضرب كردن au_u , در
عرض b_p و طول چسبندگی L (مربوط به ناحيه چسبندگی) به دست میآيد.

1997)¹⁸ مدل مائدا و همکاران¹⁸ (1997)

v- Hiroyuki and Wu(1997)

r- Tanaka(1997)

r-Maeda et al(1997)

در این رابطه, E_p , بر حسب مگا پاسکال و t_p , بر حسب میلیمتر به ترتیب مدول الاستیسیته و ضخامت صفحه تقویتی چسبانده شده بر روی بتن هستند. حداکثر مقاومت چسبندگی, P_u , از حاصلضرب τ_u , در سطح مؤثر چسبندگی یعنی $b_p.\tau_u$ به دست میآید. طول مؤثر چسبندگی از رابطه زیر حاصل میشود[۲۸]. $L_e = e^{0.13 - 0.580/nE_pt_p}$ mm

در رابطه فوق $E_p t_p$, بر حسب میلیمتر-گیگا پاسکال است.

(۲-۴)

$$p_{u} = \begin{cases} 0.78b_{p}\sqrt{2GE_{p}t_{e}} & \text{if } L \ge L_{e} \\ 0.78b_{p}\sqrt{2G_{f}E_{p}}\frac{L}{L_{e}}\left(2-\frac{L}{L_{e}}\right) & \text{if } L < L_{e} \end{cases}$$

$$(9-9)$$

در این رابطه
$$E_p t_e$$
 بر حسب میلیمتر – مگا پاسکال بوده و p_u بر حسب نیوتن به دست میآید. همچنین
برای محاسبه L_e (طول مؤثر چسبندگی) و G_f (انرژی گسیختگی) می توان از روابط زیر استفاده کرد[۲۸].

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{4f_{ctm}}} mm \tag{1.-f}$$

$$G_f = c_f K_p^2 f_{ctm} \quad Nmm/mm^2 \tag{11-f}$$

در این روابط f_{ctm} متوسط مقاومت کششی سطح بتن(بر حسب مگا پاسکال) است که مقدار آن با انجام آزمایش استاندارد کشش تعیین می شود. c_f یک مقدار ثابت بوده که از رگرسیون خطی نتایج آزمایش

v-Holzenkampfer(1994)

برش دو طرفه یا آزمایشی مشابه آن به دست میآید. و K_p یک فاکتور هندسی است که به عرض صفحه چسبانده شده, b_p , و عرض عضو بتنی, b_c , (هر دو بر حسب میلیمتر) بستگی دارد[۲۸].

$$K_p = \sqrt{1.125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \tag{17-f}$$

20-2-2-2 مدل تالجستن

$$P_u = \sqrt{\frac{2E_p t_p G_f}{1 + \alpha_T}} b_p \tag{17-F}$$

$$\alpha_T = \frac{E_p t_p}{E_c t_c} \tag{14-4}$$

در این روابط E_c و t_c مدول الاستیسته و ضخامت عضو بتنی هستند [۲۸].

3-2-7-4- مدل يوان و وو

در این مدل, بررسی چسبندگی FRP و بتن بر اساس آنالیز مکانیک شکست خطی الاستیک صورت پذیرفت. نتایج مطالعه خطی به رابطهای مشابه رابطه تالجستن[۱۵] منتهی شد، با این تفاوت که اثر عرض صفحه چسبانده شده و نیز عرض مقطع بتنی, با جایگزینی α_Y به جای α_T در رابطه فوق وارد گردید[۲۸].

$$\alpha_{Y} = \frac{b_{p}E_{p}t_{p}}{b_{c}E_{c}t_{c}}$$
(1Δ-4)

در رابطه بالا, E_p ,b_p و E_p ,b_r و E_c ,b_c و E_c ,b_c و E_c ,b_c و FRP, و E_c ,t_c و t_c ,b_c به ترتیب عرض, مدولالاستیسیته و ضخامت نمونه بتنی میباشد.

همچنین معادله مکانیک شـکسـت خطی برای پنج حالت مختلف از رابطه بین برش- لغزش, مطابق نمودار(۴-۵)، حل شد. در میان آنها حالت خطی صعودی و پس از آن نزولی مشابه شکل(۴–۱۱د), به واقعیت نزدیک تر است. لذا برای این حالت, حداکثر ظرفیت باربری به صورت زیر تعیین گردید[۲۸]. $P_u = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_2} \frac{\delta_f}{\delta_{f} - \delta_1} \sin(\lambda_2 a)$

v-Taljsten(2003)

در این رابطه, au_f , حداکثر مقدار تنش چسبندگی در منحنی برش- لغزش و δ_1 و δ_f به ترتیب مقدار لغزش متناظر با au_f و حداکثر لغزش میباشد.



شكل4-5- نمودار هاي تنش چسبندگي برشي- لغزش در محل اتصال پليمر هاي اليافي با بتن[28]

مقدار a در معادله(۴–۱۶) از حل معادله زیر به دست میآید[۲۸].

 $\tanh[\lambda_1(L-a)] = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tan(\lambda_2 a) \tag{1V-F}$

و λ_2 و λ_2 توسط روابط زیر تعیین میشوند. λ_1

$$\lambda_1^2 = \frac{\tau_f}{\delta_1 E_p t_p} (1 + \alpha_Y) \tag{1A-F}$$

$$\lambda_2^2 = \frac{\tau_f}{(\delta_f - \delta_1) E_p t_p} \left(1 + \alpha_Y \right) \tag{19-F}$$

و سرانجام طول مهاری مؤثربه صورت رابطه زیر ارائه گردید[۲۸].

$$L_{e} = a_{0} + \frac{1}{2\lambda_{1}} Ln \frac{\lambda_{1} + \lambda_{2} \tan(\lambda_{2}a_{0})}{\lambda_{1} - \lambda_{2} \tan(\lambda_{2}a_{0})}$$

$$(\Upsilon \cdot - \Upsilon)$$

$$a_0 = \frac{1}{\lambda_2} \sin^{-1} \left[0.97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right] \tag{(1-f)}$$

4-2-7-4 مدل نيوبور و راستسي

برای مقاومت چسبندگی برشی, با در نظر گرفتن رابطه برشی- لغزش به صورت مثلثی مطابق شکل (۴-۵د) و همچنین طول مؤثر مهاری, روابط زیر توسط نیوبور و راستسی ارائه شد[۲۸].

$$p_{u} = \begin{cases} 0.64K_{p}b_{p}\sqrt{E_{p}t_{p}f_{ctm}} & \text{if } L \ge L_{e} \\ 0.64K_{p}b_{p}\sqrt{E_{p}t_{p}f_{ctm}}\frac{L}{L_{e}}\left(2 - \frac{L}{L_{e}}\right) & \text{if } L < L_{e} \end{cases}$$

$$(\Upsilon \Upsilon - \Upsilon)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2f_{ctm}}} \tag{YY-F}$$

 E_p در رابطه فوق, f_{ctm} , متوسط مقاومت كششي بتن بر حسب مگاپاسكال است كه بر ابر $\sqrt{f_c'}$ 0.53 در نظر گرفته ميشود. و f_{ctm} و f_{ctm} , به ترتيب مدولالاستيسيته بر حسب مگاپاسكال و ضخامت ورق FRP بر حسب ميليمتر ميباشند. مقدار K_p دررابطه (1-4) از رابطه زير حاصل ميشود. و (12-22) از رابطه زير حاصل ميشود.

$$K_p = \sqrt{1.125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \tag{(YF-F)}$$

انرژی شکست را نیز میتوان با رابطه زیر تعیین نمود[۲۸].
(۲۵-۴)
مقدار متوسط ۲۰۲۴ میلیمتر برای
$$G_F = C_F f_{ctm}$$
 ، نمونههای آزمایشی پیشنهاد شد.
۲-7-4 روابط ارائه شده برای طراحی
۲-۷-۴ رابطه ونجرمرت –برسنز (۱۹۹۷)
با فرض پخش مثلثی تنش برشی در کل طول چسبندگی (به صورتی که به حالت خطی از انتهایی که به آن

تنش وارد می شود تا رسیدن به صفر در انتهای دیگر) ونجرمرت رابطه زیر را برای طراحی پیشنهاد نمود[۲۸].

$$P_U = 0.5Lb_P f_{ctm} \tag{(17-4)}$$

در اين رابطه, P_u, مقاومت چسبندگي نهايي, f_{ctm}, مقاومت کششي سطح بتن که برابر مدول گسيختگي بتن در نظر گرفته مي شود, و L مول اتصال ميباشد.

$$\tau_u = \frac{\tau_{max}}{2} = \frac{2.7}{1 + K_1 \tan 33^\circ} \quad Mpa$$
 (YV-Y)

در این رابطه، پارامتر بدون بعد K_1 , از رابطه زیر به دست می آید.

$$K_1 = t_P \sqrt[4]{\frac{K_n}{4E_p I_p}} \tag{YA-F}$$

$$K_n = E_a \frac{b_a}{t_a} \tag{Y9-F}$$

در این رابطه, E_a و b_a به ترتیب مدول الاستیسیته، عرض و ضخامت لایه چسب, و I_p ممان Ip و این رابطه, FRP میباشد.

7-4-3-3-4 مدل خاليفا و همكاران (1998)

در این مدل مقاومت چسبندگی FRP و بتن به صورت تابعی از $\left(f_{c}^{\prime}
ight)^{2/_{3}}$ با رابطه زیر تعریف میشوند[۲۸].

$$\tau_u = \frac{110.2}{10^6} \left(\frac{f'_c}{42}\right)^{2/3} E_p t_p \quad Mpa \tag{(7.-4)}$$

در رابطه فوق, au_u , تنش برشی مجاز قابل حمل توسط سطح مشترک بتن و صفحات پلیمری الیافی و au_u و au_v , t_p و au_p , به ترتیب مدولالاستیسیته بر حسب مگاپاسکال و ضخامت ورق FRP بر حسب میلیمتر میباشند.

4-3-7-4 مدل چن و تنگ این مدل از ترکیب آنالیزهای مکانیک شکست و شواهد و مدارک تجربی و آزمایشی تشکیل شده است و پیشبینی نسبتاً دقیقی دارد. در این مدل نیز رفتار برش- لغزش اتصال صفحات FRP به بتن را میتوان با یک مدل مثلثی بیان کرد. برای این اتصال، مقدار $\delta_f = 0.02mm$ (لغزش متناظر با نقطه پیک نمودار) و $\delta_f = 0.2mm$ میباشد. به دلیل

$$P_{u} = \begin{cases} \tau_{f} b_{p} / \lambda & \text{if } L \ge L_{e} \\ (\tau_{f} b_{p} / \lambda) \sin(\lambda L) & \text{if } L < L_{e} \end{cases}$$

$$(\Upsilon^{1} - \Upsilon)$$

$$L_e = \frac{\pi}{2\lambda} \tag{(77-F)}$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f}{\delta_f E_p t_p} (1 + \alpha_Y) \tag{(TT-F)}$$

مقاومت پيوستگي نهايي، به مقاومت كششي سطح بتن بستگي دارد. نتايج آزمايشگاهي مختلف نشان ميدهد كه مقاومت پيوستگي با $\frac{b_p}{b_c}$ متناسب ميباشد. نسبت عرض صفحه پليمري اليافي به عرض عضو بتني, $\frac{b_p}{b_c}$, نيز در مقدار مقاومت پيوستگي تاثيرگذار است. با تحليل رگرسيون بر روي آزمايش ها ، مقاومت پيوستگي ز هايي با ضريمي رض صفحه پ لم يمري ال پيافي م تصل شده به بن تمن, β_p , نسبت خطي دارد كه از رابطه زير به دست ميآيد[28].

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / b_c}} \tag{(\%-\%)}$$

.با در نظر گرفتن روابط بالا و تحليل رگرسيون بر روي نتايج به دست آمده، مقاومت پيوستگي نهايي مطابق رابطه زير تعيين ميشود[**28**].

$$P_u = 0.427\beta_p \beta_l \sqrt{f_c'} b_p L_e \tag{7.5}$$

در رابطه فوق, طول مهاري موثر و ضريب طول موثر, eta_l , از روابط زير به دست ميآيند.

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f_c'}}} \quad (mm) \tag{17.4}$$

$$\beta_l = \begin{cases} 1 & \text{if } L \ge L_e \\ \sin[\pi L/(2L_e)] & \text{if } L < L_e \end{cases}$$

$$(^{\forall \vee_- \forall})$$

E_p و t_p, به ترتيب مدول الاستيته بر حسب مگا پاسکال و ضخامت صفحههاي پليمري اليافي بر حسب ميليمتر, L و L_e, به ترتيب طول و طول موثر پيوستگي بر حسب ميليمتر و '*f*ر, مقاومت فشاري بتن بر حسب مگا پاسکال ميباشند.

با استفاده از روابط آماري بر روي نتايج آزمايش.ها و حاشيه اطمينان **0/95** به منظور ارائه روابط طراحي، عدد **0/427** در رابطه**(2-32)** به عدد **0/315** كاهش داده شده است، در نتيجه مقاومت پيوستگي برشي طراحي از رابطه زير به دست ميآيد[**28**].

$$P_u = 0.315\beta_p \beta_l \sqrt{f_c'} b_p L_e \tag{(\%-\%)}$$

با بررسي آزمايش هاي انجام شده، باري كه باعث ايجاد ترك در عضو مي شود، حدود 60 درصد بار نهايي مي باشد. در نتيجه، بار بهر مبر داري از رابطه زير به دست مي آيد[28].

$$P_u = 0.2\beta_p \beta_l \sqrt{f_c'} b_p L_e \tag{(7.4-4)}$$

با توجه به رابطه فوق براي اينكه نيروي بيشتري از صفحه پليمري اليافي به بتن منتقل شود بايد از صفحههاي پليمري اليافي با ضخامت كمتر و مدول الاستيته بيشتر استفاده شود.

فصل پنجم

روش هاي پيش بيني ظرفيت برشي تير هاي مقاومشده با FRP

1-5- ييشىگفتار

تاكنون بررسيهاي متعددي جهت تخمين ظرفيت برشي تيرهاي بتن آرمه مقاومشده با FRP انجام شده است و مدلهاي تحليلي بر اساس فرضيات متفاوت تئوري و نتايج آزمايشگاهي ارائه شدهاند.

تريانتافيلو (1998)²¹ مدلي تئوري براي محاسبه ظرفيت برشي تيرهاي مقاومشده با FRP ارائه نمود. بعدها اين مدل پيشنهادي با استفاده از نتايج 75 آزمايش اصلاح گرديد, كه نتيجه آن تعيين عبارتي براي پيش بيني كرنش مؤثر در لايه FRP بود. در سال 2001 ماتهيز و تريانتافيلو²² اصلاحي جزيي بر روي عبارت كرنش مؤثر ارائه شده توسط تريانتافيلو و آنتونوپولوس (2000)²³ انجام دادند و نشان دادند كه علاوه بر عوامل متعدد مؤثر در تقويت برشي، كرنش مؤثر PRP همچنين تابعي از نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر تير مي باشد. ديگر محققان نيز تلاشهاي فراواني جهت ارائه روشي مناسب براي مقاومسازي برشي با FRP انجام دادند كه منجر به تدوين دستور العمل هايي در اين زمينه, در آيين نامه هاي مختلفي همچون محافلان متحده، SISI كانادا، fib اروپا و ... گرديد.

اكثر محققان، تركيبات _{FRP} استفاده شده براي مقاومسازي برشي را به عنوان خاموتهاي خارجي در نظر گرفته و با فرض اينكه _{FRP} ميتواند مستقيماً در برابر نيروهاي برشي مقاومت كند، از روشهاي قديمي طراحي خاموتها همچون مدل تراس و تئوري ميدان فشاري، براي پيشبيني سهم برشي FRP استفاده نمودند. تفاوت عمده بين روابط مختلف در پيش بيني كرنش مؤثر FRP و تنش در لحظه شكست بود[**30].**

2-5- بررسي مدلهاي مختلف ارائه شده در تقويت برشي

5-2-5- مدل شبيه سازي خرپايي يا STRUT & TIE

اين روش كه مبناي اكثر آيين نامه هاست براي نخستين بار توسط يك مهندس سوئيسي به نام ريتر²⁴ در سال **1989** به كار برده شد. در اين مدل. نقش آرماتو هاي برشي در تير هاي بتن آرمه به نقش اعضاء قطري و قائم خريا تشبيه ميشود. در يك خرياي ساده مطابق شكل (5-1 الف), اعضاء فوقاني و تحتاني به ترتيب تحت فشار و كشش و اعضاء مايل نيز متناوباً تحت فشار و كشش هستند. عمل آرماتور هاي برشي در اين حال فرقاني و تحتاني به ترتيب تحت فشار و كشش و اعضاء مايل نيز متناوباً برشي در تير هاي بين آرمه به نقش در اين مدل. در يك خرياي ساده مطابق شكل (5-1 الف), اعضاء فوقاني و تحتاني به ترتيب تحت فشار و كشش و اعضاء مايل نيز متناوباً تحت فشار و كشش هستند. عمل آرماتور هاي برشي در اين حالت زمان و كشش هستند. عمل مرماتور هاي برشي مايل را مي توان مطابق تصوير (5-1 ب) به رفتار خرياي شكل (5-1 الف) مرابزي در اين مدل. تحت فشار و كشش و اعضاء مايل نيز متناوباً تحت فشار و كشش هستند. عمل مرماتور هاي برشي مايل را مي توان مطابق تصوير (5-1 ب) به رفتار خرياي شكل (5-1 الف) مرابزي در اين مدل. در اين مدل مو

v-Triantafillou (1998)

r-Matthys and Triantafillou (2001)

v-Ritter(1989)

r-Triantafillou and Antonopoulos (2000)

ميكنند. براي اين منظور آرماتور هاي برشي در بالا و پايين به تقويت هاي طولي فشاري و كششي مهار ميشوند[**31**].



(ب)

(الف)

شكل 1-5- تشابه خربا براي آرماتور برشي تيرها [31]

1-2-5-1 اختلاف بين FRP و خاموت هاي فولادي

با در نظر گرفتن مهار هاي مناسب در اتصال ميلگردهاي برشي به آرماتور هاي طولي, ميتوان مقاومت كششي را تقريباً براي ارتفاع كامل آنها متصور شد و فرض نمود كه آرماتور هاي برشي در عرض ترك قطري به نقطه تسليم خود ميرسند. مطابق تحقيقات نيلسون²⁵(1997)[32] خاموت هاي فلزي داراي 4 عملكرد مجزا براي افزايش مقاومت برشي اعضاء بتنآرمه ميباشند. البته بايد خاطر نشان كرد كه اگرچه آرماتور هاي عرضي مقاومت برشي تير ها را افزايش ميدهند، اما قبل از تشكيل تركهاي قطري تأثير محسوسي بر رفتار اين اعضاء ندارند. اندازهگيريهاي متعدد نشان دادهاند كه قبل از ايجاد تركهاي قطري، آرماتور هاي برشي عملاً خالي از تنش ميباشند و تنها پس از تشكيل تركهاي قطري وارد عمل شده و 4 وظيفه عمده زير را انجام ميدهند(شكل (2-3))[32].

- ۱ مقاومت در برابر بخشي از نيروي برشي(۷)
 ۲ ممانعت از توسعه و باز شدن تركهاي قطري و كاهش نفوذ آنها به ناحيه فشاري كه باعث افزايش ۷٫۰ میشود.
- ٣- جلوگيري از عريض شدن تركها به طوريكه سطح دو ترك در تماس بسته باقي ميمانند, اين عمل نيروي سطح مشترك (٧_i) قابل توجهي را ايجاد ميكند.
- ۴- ایجاد پیوند محکمتر میلگردهاي طولي به هسته بنن که در نتیجه آن علاوه بر افزایش مقاومت برشي این میلگردها (۷٫), یکپار چگي بیشتري در مقطع به وجود ميآید.

v-Nilson(1997)

بنابراين ميتوان گفت خاموتها نه تنها به طور مستقيم در برابر نيروي برشي مقاومت ميکنند بلکه سهم بتن را نيز افزايش ميدهند.

سيستمهايFRP داراي ويژگي و رفتار متفاوتي نسبت به آرماتور هاي برشي هستند, چنانچه صفحات FRP براي افزايش مقاومت برشي به صورت پوشش u شكل استفاده شوند, ميتوان فرض نمود كه اين صفحات در زير تير مهار شده و در انتهاي بالايي آزاد هستند و در صورتيكه صفحات FRP تنها در دو طرف تير نصب شوند, براي آنها هيچ مهاري در بالا و پايين نميتوان متصور شد. لذا بدون وجود مهار هاي معين، فرضيه مورد استفاده در آييننامه ACI و بسياري از روابط موجود در تعيين سهم برشي صفحات PRP, مبني بر توسعه مقاومت برشي در امتداد ارتفاع كامل FRP فاقد اعتبار است.



شكل2-2- نيروهاي ايجاد شده در محل ترك قطري در تير بدون FRP [32]

استفاده از الگوي دورپيچ كامل FRP معمولاً غير عملي است, با اين وجود، در اين حالت ميتوان FRP را به صورت مهار شده فرض نمود. در همه نمونههاي ديگر، چسبندگي بين بتن و صفحات FRP تعيين كننده تنش موجود در آن است. لذا تنش در FRP در امتداد الياف يكنواخت نميباشد، تنش نزديك ترك برشي زياد و در فاصلهاي دورتر از ترك اين مقدار بسيار كم و قابل اغماض است. به اين ترتيب ميتوان نتيجه گرفت كه FRP تنها در يك ناحيه محدود مؤثر بوده و در خارج اين ناحيه هيچ تأثيري بر برش ندارد.

عمل اصلي صفحات FRP محدود نمودن توسعه تركها و كاهش عرض آنهاست. نيروي كششي موجود در FRP يك نيروي فشاري برابر و با جهت مخالف بين سطوح ترك ايجاد نموده و باعث افزايش اصطكاك برشي(v_i), در ترك ميشود(شكل(**2-3)).** اين صفحات همچنين ميتوانند با جلوگيري از نفوذ تركها به داخل ناحيه فشاري, v_{cz} را افزايش دهند. در صورت استفاده از FRP در اطراف و زير تير, اين صفحات ميتوانند مقاومت برشي ميلگردهاي طولي را نيز بهبود بخشند.

به طور كلي ميتوان گفت نيروي كششي موجود در FRP باعث ايجاد نيروي فشاري بين سطوح ترك بتن ميشود (شكل (**3-5))** و بنابر اين FRP نميتواند مانند ميلكر دهاي عرضي مستقيماً در بر ابر برش مقاومت نمايد و تنها سهم برشي بتن را افزايش ميدهد. افزايش سهم بتن به منظور مقاومت در بر ابر برش توسط FRP, معمولاً به عنوان سهم FRP (V_{FRP}), به صورت جداگانه در نظر گرفته شده و از افزايش مقدار _{Va}و _V توسط آن چشم پوشي ميشود[**32**].



شكل5-3- نيروهاي ايجاد شده در محل ترك قطري توسط FRP [32]

2-2-2- تئوري ميدان فشاري اصلاح شده (MCFT)

تئوري ميدان فشاري اصلاح شده يكي از روش هاي مطرح براي تعيين سهم برشي اعضاء بتن آرمه ميباشد كه در سال **1986** توسط وكچيو و كالينز²⁷ معرفي شد[**33**]. با افزايش روزافزون استفاده از تكنيك مقاوم سازي برشي اعضاء بتن آرمه با FRP، مطالعات متعددي شامل تعيين سهمFRP با استفاده از روشMCFT, در سال هاي اخير انجام شده است. مالك و سعادت منش (**1998)** از اين روش براي محاسبه سهم صفحات FRP با تغيير زاويه ترك استفاده كردند. آنها در مدل خود فرض نمودند كه توزيع كرنش در FRP يكنو اخت است و هيچ گونه لغز شي بين FRP و بتن وجود ندارد. ليز و همكار ان (**2002**)⁸² نيز توسعه كرنش در صفحات FRP را با استفاده از روش MCFT بر پايه فرضيات مشابه تحليل نمودند. به طور كلي در اين تئوري فرض بر اين است كه زاويه ترك خوردگي بتن متغير بوده و چسبندگي كامل بين بتن و هرقه جRP برقرار است[**34**].

3-2-5- تئوري اصطكاك برشي

در آييننامه هايي نظير ACI و AASHTO روش اصطكاك برشي، هدايت انتقال برش را در امتداد يك صفحه معين مانند سطح بين يك ترك موجود، سطح مشترك بين مواد ناهمسان يا بين سطوح بتن كه در فواصل زماني متفاوت ريخته شدهاند, بررسي ميكند[**31**]. شكل(**5-4)** يك بلوك بتني ترك خورده با تقويت هاي طولي متقاطع با ترك را نشان ميدهد. نيروي برشي v موازي ترك عمل نموده و باعث لغزش نسبي دو نيمه ميشود. به علت زبري سطح ترك، لغزش باعث جدايي دو نيمه شده كه اين جداشدگي، كشش موجود در تقويت هاي داخلي را افزايش ميدهد. برايند نيروي برشي، مواز ي برشي، فساري برابر

v-Modified Compression Field Theory

r-Vecchio and collions (1986)

r-lees et al (2002)



شكل5-4- يك بلوك بتني ترك خورده[31]

در اين روش مبناي تعيين نيروي برشي ايجاد شده، رابطه زير ميباشد[**37**].

FRP روابط طراحي موجود در تخمين ظرفيت برشي FRP

در اكثر آيين نامه ها و روابط طراحي سهم برشي بتن، فو لاد و FRP به صورت مجزا در قالب رابطه زير ارزيابي مي شوند.

 $V_n = V_c + V_s + V_{FRP} \tag{(7-2)}$

که در آن

_V و _V را ميتوان مطابق روابط ارائه شده در هر يک از آييننامههاي موجود محاسبه نمود. بنابراين اختلاف عمده بين طرحهاي موجود در ارزيابي سهم FRP در تقويت برشي است. که در ادامه برخي از روابط ارائه شده به اجمال تشريح ميشود.

5-3-5- رابطه ارائه شده توسط چالال و همکاران29 (1998)

چالال و همكاران[35] رابطه زير را براي تعيين مقاومت برشي تامين شده توسط FRP ارائه نمودند:

$$V_{FRP} = \phi_{FRP} A_{FRP} f_{FRP} \frac{(\sin\beta + \cos\beta)d}{S_{FRP}}$$
(*-2)

كه در آن f_{FRP} , مقاومت كششيFRP, 8.9 $\phi_{FRP} = 0.8$, ضريب كاهش مقاومت FRP, A_{FRP} , مساحت مقطع عرضي جفت نوار FRP, β , زاويه امتداد الياف نسبت به محور افق در جهت عقرب**ه اي** $oldsymbol{A}$

فرضيه اساسي در ارائه اين روش اين است كه سهم FRP براي ظرفيت برشي مشابه سهم ميلگردهاي برشي داخلي است و اين بدان معناست كه همه نوار هايFRP قطع شده توسط ترك برشي در لحظه گسيختگي تير, به مقاومت كششي نهايي خود ميرسند, مگر اينكه طول چسبندگي آنها ناكافي باشد. اين فرضيه بسيار خوش بينانه است و نقطه ضعف اساسي اين مدل به شمار ميآيد[**35**].

2-3-5 مدل ارائه شده توسط تريانتافيلو 30(1998)

(0-0)

تريانتافيلو[**36**] اظهار داشت كه هيچگاه نميتوان به طور دقيق سهم FRP در ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه مقاومشده را پيشبيني نمود, چرا كه مكانيزم شكست و عوامل مختلف متعددي در تعيين سهم FRP مؤثر هستند. او در نهايت از يک روش عددي كه منجر به معادله طراحي زير در قالب آييننامه اروپا شد, استفاده نمود.

$$V_{FRP} = \frac{\partial/9}{\gamma_{FRP}} \rho_{FRP} E_{FRP} \varepsilon_{FRP,e} b_w d(1 + \cot \beta) \sin \beta$$

در معادله فوق, _{EFRP}, مدول يانگ FRP, _{FRP}, نسبت سطح _{bw}, FRP, _{FRP}, عرض تير بتنآرمه و _{γFRP}, فاکتور ضريب ايمني جزيي براي FRP در کشش تک محوره است که در حدود **1/15, 1/20** و 1/25 به ترتيب براي الياف کربن، آرميد و شيشه در نظر گرفته ميشود.

كرنش مؤثر FRP, كرنش در مرحله شكست است كه با استفاده از نتايج آزمايشگاهي به شكل زير قابل محاسبه مى باشد [**36**].

 $\varepsilon_{FRP,e} = 0.0119 - 0.0205\rho_{FRP}E_{FRP} + 0.0104(\rho_{FRP}E_{FRP})^2$

$$0 \le (\rho_{FRP} E_{FRP}) \le 1$$
 (6-5)

$$\varepsilon_{FRP,e} = -0.00065 \rho_{FRP} E_{FRP} + 0.0024s \qquad \rho_{FRP} E_{FRP} > 1$$
 (7-5)

v-Chaallal et al(1998)

v-Triantafillou(1998)

ر ابطه بالا بر اي محاسبه سهم نو ار هاي FRP در تعيين ظرفيت برشي نيز به كار ميرود. ضعف عمده اين مدل در اين است كه تفاوت خاصي بر اي الگو هاي مختلف مقاومسازي نظير الگوي دورپيچ كامل و استفاده از FRP روي دو وجه جانبي تير و همچنين حالتهاي شكست متفاوت, قائل نشدهاست.

3-3-5- مدل خاليفا و همكاران³¹ (1998)

خاليفا و همكاران[**37**] با در نظر گرفتن سطح كرنش در گسيختگي به عنوان كرنش مؤثر _{۶۶_{fe}, رابطه تريانتافيلو **(1998)** در تعيين سهم تقويتهاي FRP در ظرفيت برشي را به صورت زير بيان نمودند.}

$$V_{\text{FRP}} = \rho_{FRP} \mathcal{E}_{FRP} \mathcal{E}_{FRP,e} b_w \theta.9 d(1 + \cot\beta) \sin\beta$$
(A-2)

در رابطه فوق,
$$b_w$$
 عرض مقطع عرضي تير، d فاصله سطح فشاري تير تا مرکز آرماتور هاي p_w برشي و ρ_{FRP} , نسبت سطح FRP, ميباشد. که با استفاده از رابطه زير تعيين ميشود[**37**].
 $\rho_{FRP} = (\frac{2t_{FRP}}{b_w})(\frac{W_{FRP}}{S_{FRP}})$

پار امتر هاي استفاده شده در اين رابطه عبارتند از:
$$t_{FRP}$$
, ضخامت صفحه FRP روي يک وجه
تير (mm)، W_{FRP} , عرض نوار هاي FRP، FRP، فاصله نوار هاي FRP.
اين معادله را در فرمت آيين نامه ACI به صورت زير ميتوان نوشت[**37**].
 $V_{FRP} = \frac{A_{FRP}f_{FRP,e}(\sin\beta + \cos\beta)d_{FRP}}{S_{FRP}}$, $f_{FRP,e} = \varepsilon_{FRP,e}E_{FRP}$

$$R = \frac{\varepsilon_{FRP,e}}{\varepsilon_{FRP,u}} = \frac{f_{FRP,e}}{f_{FRP,u}}$$
با توجه به نتایج آزمایشگاهي, چندجملهاي زیر براي R استخراج شد.

$$R=0.5622(\rho_F E_F)^2 - 1.2188(\rho_F E_F) + 0.778 \le 0.5$$

اطلاعات آزمايشي استفاده شده در ارائه مدل كرنش مؤثر خاليفا شامل دو نوع سيستم مختلف FRP (CFRP;AFRP) ، سه الكوي مقاوم سازي (دور پيچ كامل، پوشش U شكل و پوشش دو وجهي) و

r-Khalifa et al(1998)

تقويت هاي ممتد و نواري با زاويه الياف °45 و °90 ميباشد. اگرچه مطابق شكل (5-5) همه نتايج داراي رفتار يكساني هستند, اما بررسي اين روش مستلزم برآورد نتايج آزمايشي بيشتري است. به طور مثال تنها 4 نمونه آزمايشي مقاوم شده با AFRP در نظر گرفته شد. كه اين تعداد, در دادن حكم قطعي در استفاده از معادله فوق براي محRP بسيار كم است. بنابراين استفاده از اين روش تنها براي قطعي در استفاده از معادله فوق براي محمود مده با AFRP بسيار كم است. بنابراين استفاده از اين روش تنها براي قطعي در استفاده از معادله فوق براي محمود شده با AFRP بسيار كم است. بنابراين استفاده از اين روش تنها براي نمونه هاي مقاوم شده با AFRP محدود شده در حاليكه رابطه ارائه شده براي ممه زواياي موجود داراي الياف با زاويه °45 و °00 محدود شده در حاليكه رابطه ارائه شده براي همه زواياي موجود پيشنهاد شده است. با اشاره به اين مطلب كه مدل كرنش مؤثر فقط زماني كه گسيختگي از نوع پارگي پيشنهاد شده است. با شاره به اين مطلب كه مدل كرنش مؤثر فقط زماني كه گسيختگي از نوع پارگي موجود مربوط به چسبندگي بتن و AFR اين محلم مي ايست. مدل مياند اي معادله اي ممه زواياي موجود پيشنهاد شده اين محلول و °50 ميده در حاليكه رابطه ارائه شده براي همه زواياي موجود پيشنهاد شده اين محلول كرنش مؤثر فقط زماني كه گسيختگي از نوع پارگي بي ايم ايست, كاربرد دارد. لذا خاليفا و همكار انش[37] مدل ديگري را با در نظر گرفتن مشخصه هاي مربوط به چسبندگي بتن و FRP مبتني بر مدل مقاومت چسبندگي مائيدا و همكار ان [38] ³² ارائه مربوط به چسبندگي بين د FRP مبتني بر مدل مقاومت چسبندگي مائيدا و همكار ان [38] ³² ارائه مرودند.



شكل5-5- تغييرات R نسبت به سختى محوري[37]

مائيدا و همكار انش**(1997)** مكانيزم چسبندگي صفحات FRP با بتن را به وسيله آزمايش كشش ساده مورد بررسي قرار دادند. آنها بر اساس نتايج آزمايشگاهي، مفاهيم طول مؤثر چسبندگي و مقامت چسبندگي متوسط را معرفي نموده و معادلاتي را جهت پيشبيني رفتار چسبندگي پيشنهاد كردند. روش طراحي خاليفا بر مبناي مكانيزم چسبندگي, شامل تنش متوسط چسبندگي, طول مؤثر چسبندگي، _{Le} و عرض مؤثر چسبندگي، _{Wfe} است و با رابطه زير تعيين ميشود[**37**].

$V_{FRP} = \frac{2L_{e}w_{FRP}\tau_{bu}w_{FRP,e}}{S_{FRP}} $	(14-0)
--	--------

v-Maeda et al(1997)

$$\tau_{bu} = K \left(\frac{f_c}{42}\right)^{2/3} E_{\text{FRP}} t_{\text{FRP}}$$
(12-2)

$$L_e = e^{6.134 - 0.58ln(t_{FRP}E_{FRP})} \tag{19-2}$$

$$w_{FRP,e} = d_{FRP}$$
 براي صفحات استفاده شده به صورت دور پيچ كامل
 $w_{FRP,e} = d_{FRP} - L_e$ براي صفحات استفاده شده به صورت پوشش U شكل
 $w_{FRP,e} = d_{FRP} - L_e$ براي صفحات استفاده شده بر دو وجه جانبي تير
براي صفحات نصب شده بر دو وجه جانبي تير

انجمن بتن انگلستان در آبيننامه طراحي خود براي مقاومسازي سازههاي بتني با FRP از رابطه خاليفا و همكاران استفاده نمود و توصيه كرد كه كرنش ماكزيمم در FRP نبايد از 0/004 تجاوز نمايد[**37**].



شكل5-6- مقايسه روش طراحي پيشنهاد شده توسط خاليفا و همكار انش با نتايج أزمايشگاهي[37]

5-3-4- مدل تري انتافيلو و آنتونو پولوس³³ (2000)

تريانتافيلو و آنتونوپولوس[**39**] بر اساس نتايج آزمايشگاهي طيف وسيعي از كرنشهاي مؤثر مختلف را براي انواع مختلف FRP ارائه نمودند و ضرايب متفاوتي براي دورپيچ كامل CFRP و ديگر

v-Triantafillou and Antonopoulos(2000)

نمونه هاي مقاومسازي پيشنهاد كردند. اما تفاوتي بين پوشش دو وجهي و U شكل قائل نشدند. فدراسيون بين المللي سازه هاي بتني(fib) با فرض اعمال ضريب 0/8 براي طراحي، استفاده ا زروابط كرنش مؤثر ارائه شده توسط تري*از ته افتيال و قوز تهوز وي ول وس ر ا* توصيه **ييك نهد. مط ابق** با اين مدل[39]:

$$V_{n}+V_{c}+V_{s}+V_{f} \leq V_{R2} = 0.45\nu_{co}f_{c}bd$$

$$(1^{-0})$$

$$V_{n} - \frac{A_{f}E_{f}\varepsilon_{fc}d_{f}}{(1^{-0})}$$

$$V_{f} = \frac{A_{f}E_{f}\varepsilon_{fe}d_{f}}{S_{f}}$$

$$\Box_{\Box\Box} = 0.7 - \Box_{\Box}'/200 > 0.5 \tag{(Y-2)}$$

كرنش مؤثر در اين مدل به صورت زير تعريف مي شود [39].



(21-5)

در رابطه فوق:

$$\rho_{\rm f} = \frac{\Box_{\Box}}{{}_{\rm bS_{\rm f}}} \tag{(Y-\Delta)}$$

5-3-5 مدل چن و تنگ³⁴ (2003)

چن وتنگ[**40**] به منظور بهبود نارسايي مدلهاي طراحي ارائه شده و با توجه به لزوم ارائه مدل طراحي مناسب، به ارزيابي نتايج آزمايشهاي موجود پرداختند. به علت تفاوت آشكار بين دو مد گسيختگي ناشي از پاره شدن و جدا شدن FRP، شيوه طراحي و برخورد با هر كدام متفاوت است. لذا آنها در مدل خود اين اختلاف را لحاظ نموده و به طور جداگانه روابطي براي تخمين سهم تقويت برشي FRP، ارائه نمودند كه به تفضيل در زير تشريح ميشوند.

FRP مدل مقاومت برشي براي شكست برشي ناشي از پاره شدن

v-Chen and Teng(2003)

همان طور كه پيش از اين نيز بيان شد. گسيختگي همه تير هاي مقاومشده با پوشش دورپيچ و برخي از تير هاي مقاومشده با پوشش U شكل در برش, تحت اثر پاره شدن FRP رخ ميدهد. لذا مدل مقاومت برشي ارائه شده توسط چن و تنگ[**40**] در اين بخش, براي اين دو نوع تير كاربردي است. در صورت استفاده از مهار هاي مكانيكي مناسب, از اين مدل همچنين ميتوان براي تعيين سهم برشي FRP , در تير هاي مقاومشده با پوشش دو وجهي نيز استفاده نمود.

FRP در امتدا ترک برشی FRP در امتدا ترک برشی

نتايج مطالعات نشان ميدهد كه توزيع كرنش در FRP كاملاً غير يكنواخت است. اين پديده ميتواند به اين حقيقت كه عرض ترك برشي در امتداد طولش متغير است, نسبت داده شود. چون به واسطه رفتار الاستيك و خطيFRP، كرنش در آن كاملاً به عرض ترك وابسته است.

توزيع غير يكنواخت كرنش اختلاف رفتاري بنيادي بين فولاد و تقويتهاي برشي FRP را خاطر نشان ميكند. فولاد در نقطه تسليم خود ميتواند تغيير شكلهاي پلاستيك بزرگي را تحمل نمايد، لذا منطقي است فرض شود كه تقويتهاي برشي فولادي قطع شده توسط ترك برشي در طراحي به مقاومت تسليم خود ميرسند. غير يكنواخت بودن توزيع كرنش براي تقويتهاي FRP، بدين معناست كه فرايند گسيختگي زماني آغاز ميشود كه اولين نقطه داراي بيشترين تنش به حداكثر مقاومت برشي خود برسد، سپس گسيختگي قسمتهاي مجاور در امتداد ترك برشي تا فرو ريختن كامل تير پيش ميرود. بنابراين در نظر گرفتن اين فرضيه كه FRP قطع شده توسط ترك برشي به مقاومت برشي نهايي خود ميرسد. فرضيه نادرست و غير محافظهكار انهايست. لذا چن و تنگ[3] تنش مؤثر در Saft مقاومت برشي از مقاومت و غير محافظهكار انهايست. لذا چن و تنگ[4] تش مؤثر در Saft مقاومت در نظر گرفتن اين فرضيه كه FRP مطع شده توسط ترك برشي به مقاومت برشي دهايي خود ميرسد. فرضيه نادرست و خير محافظهكار انهايست. لذا چن و تنگ[7] تنش مؤثر در Saft مقاومت جرسي را در مرحله نهايي مطابق رابطه زير تنها به صورت كسري از مقاومت

$$f_{\rm FRP} = D_{\rm FRP} f_{\rm FRP} \tag{(YT-2)}$$

$$\bar{\varepsilon}_{z} = \begin{cases} \frac{1-C\bar{Z}}{1-C}\bar{Z} & 0 \le C \le \frac{1}{\varepsilon} \\ 4C\bar{Z}(1-C\bar{Z}) & \frac{1}{\varepsilon} \le C \le 1 \end{cases}$$

$$(\Upsilon \not\in \Delta)$$

که در آن, $z = z = \overline{z}$ مشخصات قائم نر مال و $Z_b = 0.9d$, مختصات لبه پابيني FRP مؤثر که از مرکز $z_{z_b} = z_{z_b}$ سطح ميلگردهاي خمشي فو لادي محاسبه ميشود(شکل(**6-8))**[**40**].



شکل **FRP** توزیع کرنش نرمال در FRP در امتداد ترک بحراني[**40**]



شكل**5-8-** نمونه مقاوم شده با FRP [40]

عامل توزيع كرنش، D_{FRP}، به عنوان نسبت كرنش متوسط به كرنش ماكزيمم مطابق رابطه (2**4-5)** تعريف مي شود[**40**].

 $D_{FRP} = \int_{Z_f}^{Z_b} \frac{\overline{E}_z dz}{h_{FRP,e} \overline{e}_{z,max}} \qquad \qquad h_{FRP,e} = Z_b - Z_t \qquad (\Upsilon \Delta - \Delta)$

با انتگر الگیری از معادله (**23-5)** رابطه زیر برای عامل توزیع کرنش، D_{ERP}، به دست می آید [**40**].

$$\Box_{\Box\Box\Box} = \begin{cases} \frac{l+\Box}{2(l-\Box)} - \frac{\Box}{3-(l-\Box)} \left(l+\Box+\Box^{2} \right) & 0 \le \Box \le \frac{l}{2} \\ 2\Box \left(l+\Box \right) - \frac{4}{3} \Box^{2} \left(l+\Box+\Box^{2} \right) & \frac{l}{2} \le \Box \le I \ \Box\Box\Box \le \frac{1}{2\Box} \\ \frac{3(l+\Box)-2\Box \left(l+\Box+\Box^{2} \right)}{6\Box \left(l-\Box \right)} & \frac{l}{2} \le \Box \le I \ \Box\Box\Box > \frac{l}{2\Box} \end{cases}$$
(Y?- Δ)

که در آن $\frac{Z_t}{Z_b} = 3$ نسبت مختصات لبه بالايي به لبه پاييني FRP مؤثر ميباشد. براي يک تير با مختصات معين و بر اساس اين فرض که نوک ترک، به اندازه 0.1d از لبه فشاري تير فاصله دارد، لبه فوقاني FRP مؤثر به شکل زير خواهد بود[**40**]. لبه فوقاني FRP مؤثر به شکل زير خواهد بود[**40**]. (۲۷-۵)

مطابق معادله **(23-5)** شكل توزيع كرنش به ضريب c بستگي دارد. وقتي $c_{=1}$ ، توزيع كرنش به صورت سهموي با مقدار ماكزيمم $Z = \frac{Z_b}{2}$ است و اگر $c_{=0}$ باشد, توزيع كرنش خطي مي شود.

شكل (7-5) توزيع كرنش هاي مختلف را بر اساس مقادير متفاوت C نشان ميدهد. مطابق شكل (9-5) عامل توزيع كرنش، D_{FRP}، از مقدار 0/5 براي C=0/75 براي O/75 براي C=0/75 براي C=0/75 تمام ارتفاع تير توسط FRP پوشانده شده، متغير ميباشد.



شکل D_{FRP} اثر ضریب توزیع کرنش C بر D_{FRP} اثر

FRP در ظرفيت برشي FRP در ظرفيت برشي

چن و تنگ[40] با در نظر گرفتن ترک بحراني، تحت زاويه **6** نسبت به جهت طولي تير (شکل(5-8))، مقاومت برشي تامين شده توسط FRP را به صورت رابطه زير بيان نمودند.

$$V_{FRP} = 2F_{FRP,e} t_{FRP} w_{FRP} \frac{h_{FRP,e}(\cot\theta + \cot\beta)\sin\beta}{S_{FRP}}$$
(YA-2)

(۲۹-۵)

$$S_{FRP} = \frac{W_{FRP}}{\sin\beta}$$



شكل 5-10- رابطه بين w_{FRP} و S_{FRP} براي صفحات ممتد [40]

$$V_{FRP} = \frac{F_{FRP,ed}}{\gamma_{FRP}} 2t_{FRP} w_{FRP} \frac{h_{FRP,e}(\sin\beta + \cos\beta)}{S_{FRP}}$$
(\mathcal{T} - \Delta)

در رابطه فوق,
$$\gamma_{FRP}$$
 ضريب ايمني است كه برابر 1/25 پيشنهاد شد.
تنش مؤثر طراحي $F_{FRP,e}$, مطابق رابطه زير تعريف مي شود [40]:

$$F_{FRP,e} = D_{FRP} \gamma_{FRP} \tag{(7.2)}$$

$$\begin{split} \gamma_{FRP,max} &= \begin{cases} 0.8 \ F_{FRP} & IF \ \frac{F_{FRP}}{E_{FRP}} &\geq \varepsilon_{max} \\ 0.8 \varepsilon_{max} \ E_{FRP} & IF \ \frac{F_{FRP}}{E_{FRP}} > \varepsilon_{max} \end{cases} \end{split}$$

FRP مدل تقويت برشى براي شكست ناشى از جدا شدن

چن و تنگ[**41**] با فرض اينكه تنش متوسط(يا مؤثر) در FRP متقاطع با ترك برشي بحراني(شكل(**11-5)),** در مرحله حد نهايي برابر *F_{FRP,e} است سهم نوار هاي FRP در ظر*فيت برشي را براي مد شكست ناشي از جدا شدن FRP به صورت معادله زير بيان كردند[**41**].

$$V_{\rm FRP} = 2f_{\rm FRP,e}t_{\rm FRP}W_{\rm FRP}\frac{h_{\rm FRP,e}(\cot\theta + \cot\beta)}{S_{\rm FRP}}$$
($\gamma\gamma-\delta$)



شكل **11-5-** نمونه مقاوم شده با FRP به صورت پوشش دو وجهي [**41**]

با در نظر گرفتن غیر یکنواخت بودن تنشها در FRP متقاطع با ترک برشي بحراني، تنش متوسط (یا مؤثر) در FRP در حد نهايي, $F_{FRP,e}$ به صورت زیر تعریف شد[**41**]. h_{FRP,e} = D_{FRP} $\sigma_{FRP,max}$

که در آن, _{σ_{FRP,max}, ماکزيمم تنش در FRP و _{D_{FR}, ضريب توزيع تنش ميباشد. در گسيختگي با جدا شدن FRP، تنش ماکزيمم FRP در محلي که FRP بيشترين طول چسبندگي را دارد, ايجاد ميشود. در اين حالت بيشترين تنش FRP که توسط مقاومت نهايي چسبندگي محدود ميشود, از رابطه زير بدست ميآيد:}}

$$\sigma_{FRP,max} = min \begin{cases} F_{FRP} \\ 0.427\beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{FRP}\sqrt{fc}}{T_{FRP}}} \end{cases}$$
(72-2)

که در آن β_w منعکس کننده اثر نسبت عرض تیر به عرض FRP و β_L نیز در بر گیرنده اثر طول چسبندگي ميباشد که توسط روابط زير تعيين ميشوند[**41**].

$$\beta_{W} = \sqrt{\frac{2 - W_{FRP}/(S_{FRP\sin\beta})}{1 + W_{FRP}/(S_{FRP\sin\beta})}} \tag{(7.5.4)}$$

$$\beta_L = \begin{cases} l & \lambda \ge l \\ \sin\frac{\pi\lambda}{2} & \lambda < l \end{cases}$$

$$\beta_L = \begin{cases} l & \lambda \ge l \\ \sin\frac{\pi\lambda}{2} & \lambda < l \end{cases}$$

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda \ge l \\ \lambda \le l \end{cases}$$

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda \ge l \\ \lambda \le l \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e} \tag{TA-2}$$

در رابطه فوق _{Lmax} و _{Le} به ترتيب طول چسبندگي ماکزيمم و طول چسبندگي مؤثر ميباشند که توسط رابطه فوق (Lmax و (39-5) و (40-5) تر عيمين ميشدود.

$$L_{e} = \sqrt{\frac{L_{FRP}E_{RP}}{\sqrt{f_{c}^{\prime}}}}$$

$$= \sqrt{\frac{L_{e} - \sqrt{f_{c}^{\prime}}}{\sqrt{f_{c}^{\prime}}}}$$

$$= \sqrt{\frac{L_{e} - \sqrt{L_{e}}}{\sqrt{J_{e}}}}$$

$$= \sqrt{\frac{J_{e}^{Z_{b}} \sigma_{FRP,z} dz}{\sqrt{J_{e}}}}$$

$$= \sqrt{\frac{L_{e} - \sqrt{L_{e}}}{\sqrt{J_{e}}}}$$

 $D_{FRP} = \frac{J_{Z_t} \sigma_{FRP,z} dz}{h_{FRP,e} \sigma_{FRP,max}}$ (*1-2)

که در آن $\sigma_{FRP,max}$ تنش FRP در عمق z ميباشد. در ارائه رابطه فوق فرض شده است که نوارهاي مجزاي $\sigma_{FRP,max}$ ميتوانند همانند صفحات پيوسته FRP رفتار نمايند. با در نظر گرفتن اين فرض،براي يک تير مقاوم شده با پوشش U شکل، تنش در قسمتي از FRP متقاطع با ترک برشي بحراني, در عمق z, در شکست را ميتوان از معادله (**36-5**) با جايگزيني $L_z = \frac{z}{\sin\beta}$ در معادله (**36-5**) به دست آورد[**41**].

$$\sigma_{FRP,Z} = \min \begin{cases} f_{FRP} \\ 0.427\beta_w \beta_{Lz} \sqrt{\frac{E_{FRP} \sqrt{f_c}}{t_{FRP}}} \end{cases}$$
(*7-2)

$$\beta_{Lz} = \begin{cases} 1 & \lambda_z \ge 1 \\ \sin \frac{\pi \lambda_z}{2} & \lambda_z < I \end{cases} ; \quad \lambda_z = \frac{L_z}{L_e} = \frac{Z}{L_e \sin \beta}$$
 (47-3)

و در نهایت عامل توزیع تنش، D_{FR}، را میتوان با جایگزین کردن معادلات **(34-5)** و **(39-5)** در معادله **(38-5)** به صورت زیر تعیین نمود[**41**].

$$D_{\rm FRP} = \begin{cases} \frac{Z}{\pi\lambda} \frac{1-\cos\frac{\pi}{Z}\lambda}{\sin\frac{\pi}{Z}\lambda} & \lambda \le 1\\ 1 - \frac{\pi-Z}{\pi\lambda} & \lambda > 1 \end{cases}$$
(**- Δ)

FRP -3-5-3-5 فاصله مجاز نوارهاي

معادلات طراحي ارائه شده توسط چن و تنگ, با فرض اينكه نوارهاي مجزاي FRP مانند صفحات ممتد معادل، رفتار ميكنند، به دست آمدهاند. براي اينكه اين معادلسازي به نتايج درستي بينجامد لازم است تعداد نوارهايي كه توسط ترك برشي قطع ميشوند، كافي باشد. براي اين منظور در صورت استفاده از پوششهاي U شكلFRP, مطابق شكل(**5-12**الف) اگر انتهاي نوار, در شروع دهانه ترك خوردگي كه در واقع عريضترين قسمت دهانه ترك است، قرار بگيرد، حداكثر استفاده از وجود نوار به عمل ميآيد. اگر وضعيت نوار FRP و ترك برشي به صورت شكل(**5-12**) تاثيري در ظرفيت برشي مقطع نخواهد داشت, چرا كه در اين حالت قبل از اينكه FRP وارد عمل شود, به علت باز شدن دهانه ترك، ممكن است شكست تير رخ دهد.

در حالت مقاومسازي با صفحات جانبي، مؤثرترين حالت مطابق شكل**(5-12**ب), زماني است كه ترک قطري از وسط نوار عبور کند. زيرا در اين حالت طول چسبندگي FRP بيشترين مقدار را خواهد داشت. اگر نوارهاي جانبي مطابق شكل**(5-12**د) بر روي تير نصب شوند، نوار قرار گرفته در انتهاي ترک به کرنش لازم خود نميرسد و نوار نصب شده در عريضترين ناحيه ترک طول چسبندگي لازم را نخواهد داشت. لذا در اين حالت FRP تاثيري در مقاومسازي ندارد[**40**].



شكلFRP در كارآيي آن [40] در كارآيي آن

(الف) موقعيت بيشترين تأثير براي حالتهاي پوشش U شكل و دورپيچ كامل, (ب) موقعيت بيشترين تأثير براي حالت نصب FRP روي دو وجه جانبي, (ج) موقعيت كمترين تأثير براي حالتهاي پوشش U شكل و دورپيچ كامل, (د) موقعيت كمترين تأثير براي حالت نصب روي دو وجه جانبي

به همين منظور چن و تنگ فاصله مجاز نوار هاي FRP را به صورت رابطه زير ارائه نمودند.

$$S_{FRP} \leq S_{FRP;max} = \frac{\Box_{FRP;e}(\sin\beta + \cos\beta)}{2}$$
پوشش U شکل (۴۵-۵)

$$S_{FRP} - \frac{W_{FRP}}{\sin \beta}$$

$$\leq lesser \ of \ \frac{\Box_{FRP,e}(1 + \cot \beta)}{2} \ and \ 300 \ mm \ izc \ equation (++.0)$$

$$h_{frame} = \frac{W_{FRP}}{\beta} \quad H_{frame} = \frac{W_{FRP}}{\beta} \quad$$

5-3-5- مدل ماتهيز و تري انتافيلو³⁵ (2001)

ماتهيز و تريانتافيلو [**42**] اصلاحيه ي برمدل تري انتافيلو و آنتونو پولوس **(2000)** انجام دادند و اثر نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر را در محاسبه كرنش مؤثر وارد نمودند. معادله كرنش مؤثر ارائه شده توسط آنها به صورت زير بيان مي شود [**42**].

$$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0.72\varepsilon_{\rm fu} e^{-0.0431} \Gamma_f & \text{FRP} \\ 0.56\varepsilon_{\rm fu} e^{-0.0455} \Gamma_f & \text{FRP} \end{cases}$$

$$(4V-2)$$

$$\mu_{fe} = \begin{cases} 0.72\varepsilon_{\rm fu} e^{-0.0431} \Gamma_f & \text{FRP} \\ 0.56\varepsilon_{\rm fu} e^{-0.0455} \Gamma_f & \text{FRP} \end{cases}$$

که در آن

$$\Gamma_f = \frac{E_f \rho_f}{f_c^2(a/d)} \tag{FA-\Delta}$$

5-3-3-1 مدل كولوتى و همكاران³⁶ (2004)

كولوتي و همكارانش مجموع تقويت برشي تامين شده در يك تير بتن آرمه مقاوم شده با FRP را به صورت رابطه زير بيان نمودند[**43].**

$$\psi = \psi_i + \psi_e \tag{(*9-2)}$$

آنها مقاومت برشي تامين شده توسط تقويتهاي برشي داخلي,
$$\psi_{ij}$$
 را با رابطه زير تعريف نمودند.
 $\psi_i = \frac{A_{stf\,ty}}{bsf_c'}$

و سهم تقويت FRP در تامين مقاومت برشي, ψ_e به صورت زير معرفي شد [43].

$$\psi_{e} = \begin{cases} \frac{2w_{f}t_{f}}{bs_{f}f_{c}}f_{fe} & \text{ , } \\ \frac{w_{f}d_{f}}{bs_{f}f_{c}}\tau_{u}; \frac{2w_{f}t_{f}}{bs_{f}f_{c}}f_{fe} & \text{ , } \end{cases} \tag{21-6} \\ \min\left(\frac{w_{f}d_{f}}{bs_{f}f_{c}}\tau_{u}; \frac{2w_{f}t_{f}}{bs_{f}f_{c}}f_{fe}\right) & \text{ , } \\ \text{ , } \end{cases}$$

در رابطههاي بالار f_{ty} و A_{st} به ترتيب مقاومت تسليم و سطح مقطع تقويتهاي عرضي b عرض f_{fe} عرض s_{ff} قاصله تقويتهاي عرضي w_f عرض $f_{fe} = s_{ff}$ فاصله نوارها از يكديگر $g_f = s_f$ مقاومت مقاومت مقاومت مقاومت موثر و v_f مقاومت جسبندگي است كه با رابطه زير تعيين مي شود.

v - Matthys and Triantafillou(2001)

r - Colotti et al (2004)

$$\tau_u = 2.77 + 0.06(f_c' - 20) \qquad f_c' > 20 \tag{27-2}$$

ACI440 مدل ارائه شده در آییننامه ACI440

آيين نامه ACI رابطه زير را براي تعيين سهم برشي FRP, پيشنهاد مي نمايد [**1**].

$$V_{FRP} = \frac{A_{fu}f_{fe}(\sin\alpha + \cos\alpha)d_f}{S_f} \tag{27-2}$$

که در آن

$$A_{fu} = 2nt_f W_f \tag{34-3}$$



شكل-14- تقويت ب رشع با FRP [1]

کرنش مؤثر، _{٤fe}، در FRP کمتر از کرنش نهايي, _{٤fu}, در نظر گرفته ميشود و به صورت زير محاسبه ميگردد[**1**].

ضريب كاهش پيوستگي، _{Kv}, تابعي از مقاومت بتن، نوع الگوي مورد استفاده در نصب FRP به تير و سختي ورق FRP است كه مطابق رابطه زير (در سيستم SI) تعريف ميشود.

$$K_{\rm v} = \frac{\mathrm{K}_1 \mathrm{K}_2 \mathrm{L}_{\rm e}}{11900 \varepsilon_{\rm fu}} \le 0.75 \tag{27.3}$$

در رابطه فوق, $_{L_e}$, طول چسبندگي مؤثر, $_{I_1}$ و $_{K_2}$ ، به ترتيب ضريب اصلاح مربوط به مقاومت بتن و الگوي نصب $_{FR}$, ميباشد كه مطابق روابط زير بيان مي شوند [**1**].

$$L_{e} = \frac{23300}{(nt_{f}E_{f})^{0.58}} \tag{\Delta V-\Delta}$$

$$K_1 = \left(\frac{f_c}{27}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{2A-\Delta}$$

$$K_{2=} \begin{cases} \frac{d_{f}-L_{e}}{d_{f}} & \text{ind} \ U \text{ ind} \ U \text{ ind}$$

5-3-9- مدل ارائه شده در آييننامه طراحي و ضوابط اجرايي بهسازي ساختمان ايران در آييننامه طراحي ايران[**44**] سهم مصالح FRP از برش به صورت زير تعيين مي شود:

$$V_{\rm frp} = \frac{\Phi_{\rm FRP} E_{\rm FRP} \varepsilon_{\rm FRP} d_{\rm FRP} (\sin\beta + \cos\beta)}{S_{\rm FRP}} \tag{7.-2}$$

که در رابطه بالا داریم:

$$A_{FRP} = 2t_{FRP} w_{FRP}$$

كرنش مؤثر مصالح FRP، FRP، از طريق آزمايش و نيز به كار بستن معادلات **(5-45)** و **(48-5)** به دست ميآيد و در هر صورت كمترين مقدار به دست آمده از دو روش فوق در نظر گرفته ميشود. ليكن بايد كرنش مؤثر _{FRP,e} به مقدار 0/004 محدود شود، زيرا در محدوده بالاتر كرنش، قفل و بست سنگدانهاي بتن به دليل باز شدگي تركها از دست ميرود[44].

$$\varepsilon_{\text{FRP},e} = R \varepsilon_{\text{FRP},u} \tag{fY-\Delta}$$

مقدار R نسبت كرنش مؤثر به كرنش نهايي در نوارهاي FRP ميباشد كه به صورت زير تعيين ميشود:

$$R = 0.8\lambda_I \left[\frac{f_c^{2/3}}{\rho_{FRP} E_{FRP}} \right]^{\lambda_2} \tag{77-4}$$

 $\rho_{FRP} = \frac{2t_{FRP}W_{FRP}}{b_W s_{FRP}}$

در رابطه **(63-63)** ضرايب
$$_{1}$$
 و $_{2}$ به قرار زير ميباشند:
الياف كرين
الياف آراميد و شيشه
 $\lambda_{2} = 0/47$ و $\lambda_{1} = 1/23$

در اين آبيننامه به منظور در نظر گرفتن امکان جداشدگي ورقههاي FRP، کرنش مؤثر برابر کمترين سه مقدار زير در نظر گرفته ميشود[**44**].

حد کرنش مؤثر 2004 =
$$\epsilon_{FRP,e} = 0.004$$
 مقدار به دست آمده از رابطه (62-5)
مقدار ارائه شده در رابطه (62-5)
مقدار ارائه شده در رابطه (65-5)
در روابط (63-5) و (63-55) ضریب کاهش کرنش مؤثر برابر **8/0** در نظر گرفته شده است. در
رابطه (65-55), _{K1} شاخصي از مقاومت برشي بتن و _{K2} شاخصي برابر نحوه قرار گيري و آرايش
مصالح FRP ميباشد که به صورت زير تعريف ميشود[**44**].



شکل**5-15-** تقویت کھ ای بر شعب FRP, (الف) بر وجوہ جانبي تير, (ب) پوشش U شکل[44]

$$K_{1} = \left[\frac{f_{c}}{27.65}\right]^{2/3}$$
(77-2)

$$K_2 = \frac{d_{FRP} - n_e L_e}{d_{FRP}}$$
(?\-\Delta)

در روابط فوق _{ne}, تعداد انتهاي آزاد نوار هاي FRP در يک سمت تير، به صورت نشان داده شده د رشکل () صيب الشد (د رصورتي که ت مها د ر د و وجه جان بي ت ير FRP داشته باشيم n_e = 2 و اگر نوار FRP به صورت U شکل باشد n_e = 1). هرگاه $K_2 \leq 0$ باشد، سيستم FRP در برش ناکار آمد است، مگر اينکه مهار FRP به روش مناسب تعيين گردد.

طول مهار هاي مؤثر، _{Le}، با استفاده از رابطه زير كه بر اساس داده هاي تجربي پيشنهاد شده است، محاسبه مي شود [**44**].

$$L_{e} = \frac{25350}{(t_{FRP}E_{FRP})^{0.58}}$$
(7A-2)
در مواردي كه تقويت برشي FRP به طور كامل تمام مقطع را دور پيچ كند، نيازي به محاسبه مقادير فوق نبوده و در اين حالت _{٤٢٣٩}٤ برابر **٥/٥٥4** در نظر گرفته ميشود.

فصل ششم

تحليل عددي تيرهاي تقويت شده در برش با نرمافزار ANSYS

1-6- پیشگفتار

روش اجزاء محدود, روشي عددي است كه ميتوان آن را براي حل مسائل متعدد و متنوع مهندسي در حالات مختلف پايدار، خطي يا غير خطي مانند تحليل تنش، انتقال حرارت و جريان سيال به كار برد. اين روش كه ريشههاي آن به سالهاي اولية 1900 ميلادي بر ميگردد، عملاً در دهة 60 ميلادي به صورت نظام يافته، مدون و وارد مباحث مهندسي به خصوص مهندسي مكانيك و عمران شد و در دهة پاياني هزاره دوم به طور شگفت آوري در مراكز علمي و صنعتي جهان رسوخ نمود.

بدون شك روش اجزاء محدود, انقلابي در صنعت جهان و نحوة نگرش به تحليل و طراحي به وجود آورد. حل مسائلي كه توسط روش معمول تحليلي غير ممكن مينمود، قابليت مدل سازي فرآيندهاي واقعي صنعتي با كمترين سادمسازيها، توانمندي روش در ارائه نتايج قابل اطمينان، كاهش هزينههاي سنگين تستهاي عملي در فرآيندهاي طراحي، سرعت بالاي روش در حل مسائل و بالاخره افزايش قابليت اطمينان و ايمني در طراحي باعث گرديد تا اين روش به عنوان جزء لاينفك پيشرفت صنعتي درآيد. نرمافزار هاي تجاري اجزاء محدود با هدف پاسخ به نيازمنديهاي علمي و صنعتي، طراحي و به بازار ارائه گرديدند. تعداد و تنوع اين نرمافزار ها امروزه به حدي رسيده كه كاربر نميتواند به راحتي يكي را انتخاب كند. گرچه قابليتها و توانمندي هاي اين نرمافزار ها متفاوت است، اما در

در ميان نرمافزار هاي عمومي اجزاء محدود، نرمافزار هاي معتبري چون NASTRAN, ABAQUS و ANSYS به چشم ميخورد كه داراي قابليتهاي بالايي ميباشند. نرمافزار ANSYS كه توسط جمعي دانشگاهي در شركت Swanson به عنوان يكي از پيشگامان نرمافزار هاي اجزاء محدود طراحي شد, اولين بار در سال **1971** در اختيار عموم قرار گرفت و با قدمتي حدود **33** سال تكامل قابل توجهي يافت. اين نرمافزار با بيش از يك صد هزار خط كد كامپيوتر, قابليت تحليل مسائل مختلف در زمينههايي مانند هوافضا، خودرو، هستهاي، نيروگاهي و الكترونيك را دارا ميباشد.

به طور كلي براي حل مسائل فيزيكي سه روش موجود است[45]:

- 1- روش تحليلي دقيق (Exact solution)
- 2- روش عددي (Numerical solution)

(Experimental Method) -3

در حل دقيق همانطور كه از نام آن مشخص است، به محاسبه دقيق پارامتري معادلات ديفرانسيل حاكم بر ميدانهاي فيزيكي همچون ميدان حرارتي، ميدان تنش، ميدان الكتريكي و ... ميپردازند. در حاليكه در روش دوم به حل تقريبي و عددي اين مسائل پرداخته ميشود. روش تجربي يا آزمايشگاهي نيز با توجه به اينكه مبتني و برگرفته از خود واقعيت ميباشد, روشي مناسب محسوب ميگردد. در اين ميان روش حل عددي كه اجزاء محدود زير مجموعه آن ميباشد، جزء يكي از پركارترين روشهاي مورد استفاده در حل مسائل مهندسي است. در روش اجزاء محدود غالباً مسائل فيزيكي به كمك معادلات ديفر انسيل حاكم بر سيستم و يا به كمك كمينه نمودن انرژي پتانيسل حل ميشوند. روش كار بدين صورت است كه كل مدل هندسي به اجزاء ريزتري به نام المان, تقسيم ميشود. هر المان خود داراي گرههايي است كه مقادير ورودي(بارگذاري و شرايط مرزي) و خروجي(نتايج) به آنها اختصاص داده ميشود[45]. به طور كلي ميتوان گفت حل عددي اجزاي محدود بر اركان زير استوار است[46]: 1- گسستهسازي و تفكيك يك عضو يا كل سازه به اجزاي كوچكتر 2- بدست آوردن معادلات حاكم بر يك جزء 4- اعمال شرايط مرزي وقيود تكيهگاهي 4- اعمال شرايط مرزي وقيود تكيهگاهي 6- حل دستگاه معادلات سيستم و بدست آوردن متغير مجهول 6- حل دستگاه معادلات بيستم و بدست آوردن متغير مجهول 6- يسپردازش و به دست آوردن ساير مجهولات

استعاد از الماير المعان معدود براي كاييد كايم ارتهيمنانهي و نير تشميل و الرريبي كايم بالعد الهدر مربوط به تير هاي بتنآرمه, به دليل رفتار پيچيده بتن امري بسيار مشكل ميباشد. در سالهاي اخير محققان تلاشهاي دامنهداري جهت شبيهسازي رفتار تير هاي بتني مقاوم شده با سيستمهاي FRP با استفاده از روشهاي المان محدود انجام دادند.

آردوني و همكاران**[47]** رفتار و مكانيزم شكست تير بتني مقاومشده با FRP را با استفاده از روش المان محدود ارزيابي نمودند. تدسكو**[48]** از روش المان محدود براي مدلسازي يك پل بتنآرمه مقاومشده با FRP استفاده كرد. در اين تحقيق المانهاي TRUSS براي مدلسازي سيستم FRP به كار بردمشد.

کاچالاکف**[49]** مدل اجزاء محدود تير هاي بتني تقويتشده با مواد FRP را با استفاده از نرمافزار ANSYS طراحي نمود. به دليل وجود تقارن در تير اصلي يك چهارم تير مدل شد.



شکل ۶-۱- مدل اجزاء محدود تیر [49]

او براي حل معادلات و بهدست آوردن نمودار بار- تغيير مكان تير مورد مطالعه، از روش تحليل غير خطي نيوتن- رافسون استفاده نمود. به دليل رفتار غير خطي بتن مسلح، همگرايي مسأله بسيار مشكل بود، لذا در تحليل اين مدل, گامهاي بارگذاري متغيري از مقادير افزايش بار زياد در زماني كه رفتار مساله خطي بود, تا شدت اعمال بار كمتر در مرحله ايجاد ترك و تسليم آرماتورهاي داخلي آمده است.



شكل 2-6- منحنى بار - تغيير مكان نمونه آز مايشگاهي در مقايسه با مدل عددي [49]

همانطور كه مشاهده ميشود, نتايج بدستآمده از تحليل عددي و دادههاي آزمايشگاهي هماهنگي خوبي را نشان ميدهند.

در ادامه به منظور بررسي اثر تركيبات FRP در تقويت برشي تيرها, شبيهسازي مدل عددي تير بتنآرمه تقويتشده در برش مربوط به آزمايش نوريس, سعادتمنش و احساني ارائه ميشود[**50**].

2-6- مشخصات نمونه هاي آزمايشگاهي

نوريس و همكاران[50] در سال **1997** جهت ارزيابي اثر سيستمهايFRP براي مقاومسازي برشي تيرهاي بتنآرمه, آزمايشهايي بر روي چند نمونه تير بتني به طول (**48**in) 1220mm و با مقطع عرضي (8in*5in)mm 127*20mm انجام دادند. تقويتهاي فولادي داخلي تيرهاي مذكور شامل دو ميلگرد كششي به قطر 16mm، دو ميلگرد فشاري به قطر 9/5mm و خاموتهايي به قطر 6mm و به فاصله (8/1in)2055 در نظر گرفته شدند. شكل (6-3) ابعاد نمونه و محل تقويتهاي فولادي را نشان مي دهد.



شكل 8-٣- ابعاد نمونه و محل تقويت هاي فو لادي [50]

ابتدا تير فاقد سيستم مقاومسازي خارجي به عنوان تير كنترل (C48), مورد مطالعه قرار گرفت. شكل(4-6) نمودار بار-تغييرمكان تير كنترل را نشان ميدهد. همان طور كه مشاهده مي شود, اين تير در برش مي شكند. در شكل(6-5) تير كنترل, در مرحله شكست نشان داده شده است. در ادامه از ورق هاي CFRP به صورت پوشش U شكل, براي تقويت تير كنترل استفاده شد. اشكال(6-6) و (6-7) به ترتيب مربوط به نمودار بار-تغيير مكان تير آزمايشي مقاوم شده با يك لايه ورقه CFRP با زاويه الياف 45± درجه (IIIFu), و تير آزمايشي مقاوم شده با در مرحله شكست نشان داده شكست. در بر درجه (IEP), مي باشند، اشكال(6-8) و (6-9) تير هاي IIIFu و IIFu و ار در مرحله شكست نشان مي دهد.







شکل۶-۹- تیر IE در شکست[**50**]

شکل۶–۸- تیر IIIFu در شکست[۵۰]

3-6- مدل المان محدود با استفاده از نرمافزار ANSYS

ايجاد مدل المان محدود شامل مدلسازي هندسي, تعريف خصوصيات مواد مشابه نمونههاي آزمايشگاهي و مش**ب غدي صدل** ميباشد كه در اين مبحث به طور كامل به آن پرداخته ميشود.

1-3-6 انواع المان

در نرمافزار هاي المان محدود مدل هندسي به لحاظ تحليلي ارزشي ندارد (منظور از مدل هندسي, مدل حاوي نقطه، خط، سطح و حجم است) بلكه در اين نرمافزار ها اساس حل از روش تقسيم مدل به المانها انجام ميشود. اين المانها با توجه به نوع تحليل و درجات آزادي مورد نظر ميتوانند المانهاي سازهاي، حرارتي و ... باشند.

- با توجه به ويژگيها و رفتار قابل انتظار، از المانهاي زير در مدلسازي تير مورد نظر استفاده شد.
 - المان ساز هاي SOLID65 بر اي مدلكردن بتن
 - المان ميلهاي LINK8 براي مدلكردن أرماتور ها
 - المان ساز هاي SOLID45 جهت مدلكردن صفحات فلزي زيربار و در محل تكيهگاهها
 - المان ساز های-لایهای SOLID46 جهت مدل کردن سیستم FRP

SOLID65 المان سازهاي SOLID65

يك المان ساز هاي سه بعدي است كه دار اي هشت گره با سه درجه آزادي در هر گره **(3**درجه جابجايي انتقالي در جهت (X،Y،Z) ميباشد و بر اي مدلسازي بتن (با يا بدون آرماتور**),** مواد ژئوتكنيكي مانند سنگها و ... مورد استفاده قرار ميگيرد.

اين المان داراي قابليتهاي تغيير شكل پلاستيك، تركخوردگي در سه جهت عمود برهم، خردشدگي، خزش، تغيير شكل و كرنشهاي بزرگ و سختشدگي تنش ميباشد. هندسه و موقعيت گرهها براي اين نوع المان در شكل**(6-10)** نشان داده شده است[**51**].



شکل۶-۱۱- Solid65 [۵۱]

LINK8 المان ميلهاي LINK8

اين المان براي مدلكردن آرماتورهاي تقويتي فولادي مورد استفاده ميگيرد. همچنين از اين المان ميتوان براي مدل كردن اعضاء خرپا، كابلها، فنرها و ... استفاده نمود. اين المان داراي دو گره با سه درجه آزادي انتقالي درجهتهاي x،y،z ميباشد و داراي قابليت تغيير شكل پلاستيك، خزش، تورم، سختشدگي تنش و تغيير شكلهاي بزرگ است. هندسه و موقعيت گرهها براي اين المان در شكل(11-6) نشان داده شده است[51].



شكل 8-١١- هندسه وموقعیت گرههای المان Link8 [۵۱]

SOLID45- المان سازهاي-3-1-3-6

يك المان ساز هاي 8 گرهي بوده كه بر اي مدلسازي صفحات فولادي مورد نياز در نقاط بارگذاري و محل تكيهگاهها استفاده ميشود. اين المان دار اي 8 گره با سه درجه آز ادي در هر گره (سه درجه جابجايي انتقالي در جهتهاي X،Y،Z) ميباشد و قابليت شكلپذيري، خزش، بر آمدگي، تغيير شكلها و كرنشهاي بزرگ را دارد[**51**].



شكل Solid45 -11-9 [51] Solid45

SOLID46 المان سازهاي-لايهاي SOLID46

اين المان داراي خواص مشابه المان SOLID45 است كه خاصيت لايهاي را علاوه بر ساير خواص دارد. و براي مدلسازي پوسته هاي ضخيم لايهاي و احجام لايهاي با امكان تعريف **250** لايه با ضخامت ثابت در هر المان و **125** لايه با ضخامت متغيير به طور خطي مورد استفاده قرار ميگيرد. هندسه و موقعيت گره ها در شكل(**13-6)** نشان داده شده است.

براي مدلسازي مواد مركب از اين نوع المان استفاده شده است. مدلسازي مواد مركب نسبت به موادي نظير آهن و فولاد مشكلتر است بنابراين بايد در مدلسازي اين مواد نهايت دقت در معرفي خواص و جهت لايهها به كار رود[**51**].



شكل Folid46 -18-8 [51] Solid46

6-2-3- خواص مواد

يكي از مراحل مهم در مدلسازي تيرهاي بتنآرمه, با نرم**اف زا ر** ANSYS تعيين خصوصيات مواد مختلف به كار رفته نظير بتن، فولاد و FRP است. اين خصوصيات ميتواند شامل جنس، خصوصيات مكانيكي و حرارتي ماده مورد نظر باشد. به علت وجود پارامترهاي متعدد مؤثر در تعريف رفتار هر يك از مواد مورد استفاده, در اين بخش اختصاصات رفتاري هر يك به صورت كامل تشريح ميشود.

6-3-1-2 بتن

بتن مادهاي است كه داراي مقاومت زيادي در فشار است و از اين رو استفاده از آن براي قطعات تحت فشار, مانند ستونها و قوسها بسيار مناسب ميباشد. ليكن علير غم مقاومت فشاري قابل توجه، مقاومت كششي كم و شكنندگي نسبتاً زياد اين ماده، استفاده از آن را براي قطعاتي كه تماماً يا بهطور موضعي تحت كشش هستند, محدود مينمايد. از آنجاييكه بتن مادهاي شكننده بوده و رفتار آن در ناحية كششي و فشاري متفاوت است، ارائه مدل عددي مناسب براي مشخص كردن رفتار اين ماده امري مشكل ميباشد. در شكل (**14-11)** منحني تنشكرنش بتن نشان داده شده است.



شكل14-6- منحني تنش- كرنش بتن [52]

همانطوركه در تصوير مشاهده ميشود، در ناحيه فشاري، تقريباً تا حدود 30 درصد ماكزيمم مقاومت فشاري بتن، رفتار منحني, خطي و الاستيك بوده، پس از اين مرحله تنش به تدريج تا زماني كه بتن به ماكزيمم مقاومت خود برسد, افزايش مييابد، سپس با ورود منحني داخل يك ناحية نرم تنش نيز كاهش يافته و سرانجام گسيختگي بتن در اثر خرد شدن در كرنش نهايي (ع) رخ ميدهد. از طرفي مقاومت كششي بتن حدود 8 تا 15 درصد مقاومت فشاري آن است و در ناحية كششي رفتار منحني تنش-كرنش, تا ماكزيمم مقاومت كششي، تقريباً خطي و الاستيك بوده، پس از آن بتن ترك

6-2-3-1 معيار كسيختكي بتن

روشهاي گسيختگي بتن شامل تركخوردن و خردشدن است و يك مدل دقيق بايد توانايي پيشبيني سطح شكست را براي چنين مادهاي داشته باشد. از آنجاييكه گسيختگي بتن ناشي از حالت تنش چند محوري است، لذا براي تعيين يك سطح شكست مناسب براي عضو بتني هر دو پارامتر مقاومت فشاري نهايي و مقاومت كششي نهايي بتن مورد نياز ميباشند**[49].**

در شكل**(6-15)** يك سطح شكست سه بعدي براي بتن نشان داده شده است. تنشهاي اصلي غير صفر، تنشهايي هستند كه در جهتهاي x و y قرار دارند و به وسيله σ_{xp}, σ_{xp} نمايش داده مي شوند. مد گسيختگي تابعي از σ_{xp} (تنش اصلي در جهت z) مي باشد. به عنوان مثال اگر σ_{xp}, σ_{xp} هر دو منفي (فشاري) و σ_{xp} مثبت (كششي) باشد، بتن در اثر ترك خوردن در سطحي عمود بر سطح σ_{xp} از بين مي رود. ولي چنانچه σ_{xp} صفر و يا منفي باشد, گسيختگي بتن در اثر خرد شدن خواهد بود.



شكل15-6- سطح شكست سه بعدي براي بتن [49]

در يك المان بتني زماني كه تنشهاي كششي در همة جهات بيرون سطح شكست قرار بگيرند، ترك ايجاد شده و مدول الاستيك المان بتني در جهتي موازي با جهت تنش اصلي كششي صفر ميشود. ولي در صورتي كه همة تنشهاي اصلي فشاري بوده و بيرون سطح شكست قرار بگيرند, المان بتني خرد شده و در نتيجه مدول الاستيك در همه جهتها صفر، و المان از بين ميرود[**49].**

با توجه به بررسيهاي انجام شده مشخص شد كه اگر قابليت خردشدگي بتن فعال باشد, مدل اجزاء محدود تير خيلي زود و نابهنگام گسيخته ميشود. در اين حالت خردشدن بتن از المانهايي كه مستقيماً زير بارها قرار دارند, شروع به رشد ميكند و در نتيجه المانهاي بتني مجاور طي چندين بارگذاري خرد شده و سختي موضعي كاهش مييابد، سرانجام مدل, يك تغيير مكان بزرگ نشان داده و رامحل واگر ميشود. از طرفي ميدانيم امكان شكست بتن تحت فشار خالص خيلي كم است و در يك آزمايش فشاري كه نمونه تحت فشار تك محوري قرار دارد كرنشهاي كشي به وسيله اثر مياشد ابتدا ترك خورده، سپس گسيخته ميشود. بنابر اين در تحليل اين مدل قابليت خردشدي غير فعال و گسيختگي مدل اجزاء محدود تير توسط نتش كششي بين در ناحية كششي ضعيف غير فعال و گسيختگي مدل اجزاء محدود تير توسط نتش كششي بين در ناحية كششي بين

6-2-1-2-3 داده هاي ورودي اجزاء محدود براي بتن

در مدلسازي تير هاي بتني به وسيله نرمافزار ANSYS سه نوع رفتار براي بتن قابل پيشبيني است كه عبارتند از [51]:

1- مدل رفتاري خطي كه در آن تنها مدول الاستيسيته و ضريب پواسون بتن داده شده و رفتار بتن در 3 جهت يكسان(همسانگرد) در نظر گرفته ميشود.

2- مدل رفتاري Concrete: در اين مدل رفتاري از سطح شکست ويليام-رانکل³⁷ استفاده ميشود و در آن ضرايب انتقال برش در حالت ترک باز و بسته, تنش فشاري تک و دو محوره بتن و تنش

v- William-Wrankle

تركخوردگي بتن تعريف ميگردد. به كمك اين مدل رفتاري ميتوان رفتار غيرخطي بتن در اثر خردشدگي(براثر تنش فشاري) و تركخوردگي(بر اثر تنش كششي) را بهخوبي مدل كرد, ولي در اكثر تحقيقات انجامشده براي مدلكردن بتن به روش اجزاي محدود از رفتار 3 محوره بتن در فشار به دليل شرايط خاص بارگذاري, صرفنظر شده و به جاي آن رفتار فشاري بتن را صرفاً به صورت تك محوره و به صورت منحني سهموي هوگنستاد يا كنت وپارك و ... در مدل MISO تعريف ميكنند.

3- مدل رفتاري³⁸MISO: دراين مدل, رفتار فشاري بتن در حالت تک محوره به صورت منحني سهموي يا 2 خطي(بسته به تقريب مورد نظر) تعريف مي شود.

به طور كلي پارامتر هاي مورد نياز براي تعريف رفتار بتن در نرمافزار ANSYS را ميتوان به صورت زير خلاصه نمود**[49].**

> 1- مدول الاستيسيته بتن (E_c) 2- مقاومت فشاري نهايي (f'_c) 3- مقاومت كششي نهايي(مدول گسيختگي (f_r) 4- ضريب پواسون(v)5- ضرايب انتقال برش براي ترک باز وترک بسته $(\beta_c \ \beta_c)$

6۔ روابط تنش-کرنش در حالت تک محوري و فشاري براي بتن

در تير مدل، مدول الاستيسيته بتن با استفاده از رابطة**(3-1)** محاسبه شد. (در اين رابطه واحدها بر حسب پوند بر اينچ مربع (psi) ميباشند**) [53].**

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c} \tag{1-7}$$

مقادير مربوط به مقاومت كششي و فشاري نهايي و نيز ضريب پواسون, مطابق مقادير آزمايشگاهي مندرج در مقاله نوريس و همكاران تعريف شد.

ضريب انتقال برش, β , نشاندهنده شر ايط سطح ترك در يك المان بتني است و دامنه تغيير ات آن بين صفر تا يك ميباشد، هنگامي كه دو طرف ترك نسبت به هم بلغز د(اتلاف كامل انتقال برش) يا به اصطلاح ترك صاف باشد، مقدار β , كم بوده و تقريبا بر ابر صفر در نظر گرفته ميشود, ولي در صورتيكه دو طرف ترك با يكديگر اصطكاك داشته و به اصطلاح سطح ترك زبر باشد, مقدار β , بر ابر يك است**[49]**.

v- Multilinear Isotropic

مطالعه بین 0/15 تا 0/2 در نظر گرفته شد. خلاصهای از مشخصات بتن استفاده شده در مدل اجزاء محدود مورد مطالعه در جدول (1-6) آمده است.

	E _C GPa	f'c MPa	f _r MPa	ν	β_t	β_c
مشخصات بتن	۳۰/۱۸۶	۳۶/۵	۲/۱۷۶	۰/۲	٠/١۵	• /٢

جدول1-6- مشخصات بتن

6-3-3-1-2-3 روابط تنش-كرنش در حالت تك محوري فشاري براي بتن

در اين تحقيق, از معادلات (2-6) و (3-6) و (4.6) براي ساخت منحني تنش-كرنش تكمحوري و فشاري بتن كه در شكل (16-6) نشان داده شده است، استفاده شد [55،54].

$$f = \frac{E_{c} \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}$$
(Y-Y)

$$\mathcal{E}_{0} = \frac{2f_{C}'}{E_{C}}$$

$$\mathbf{E}_{C} = \frac{\mathbf{f}}{\varepsilon}$$
(Y-Y)
(Y-Y)

در روابط فوق:

تنش در هر نقطه : f

 ε_0 : (f'_c) کرنش در مقاومت فشاري نهايي



شكل6-16- منحني تنش- كرنش تك محوري فشاري [49]

همان طور كه در شكل فوق مشاهده مي شود, مقدار تنش در نقطه شماره يك برابر با 0.3 *f*['] است، با قرار دادن اين مقدار در معادلة **(4-6)** كه نشان دهندة رابطة تنش-كرنش بتن در ناحيه خطي مي باشد،

$$f_1 = 0.3 f_{\rm c}^{'} = 10950000$$

$$E_c = \frac{f_I}{\varepsilon_I} \Longrightarrow 28.6 \times 10^9 = \frac{10950000}{\varepsilon_I} \Longrightarrow \varepsilon_1 = 3.83 \times 10^{-4} \text{ m/m}$$

 $\varepsilon_2 = 0.0006 m/m$

$$f_2 = \frac{E_c \varepsilon_2}{1 + {\epsilon_2 \choose \varepsilon_0}^2} \Longrightarrow f_2 = 1.6266 \times 10^7 \text{ pa}$$
$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_C} \Longrightarrow \varepsilon_0 = 0.00255 \quad m/m$$

$$\varepsilon_{1} = 0.000383 \quad m/m \Longrightarrow f_{3} = 1.095 \times 10^{7} \text{ pa}$$

$$\varepsilon_{2} = 0.0006 \quad m/m \Longrightarrow f_{3} = 1.6266 \times 10^{7} \text{ pa}$$

$$\varepsilon_{3} = 0.0013 \quad m/m \Longrightarrow f_{3} = 2.9521 \times 10^{7} \text{ pa}$$

$$\varepsilon_{4} = 0.0019 \quad m/m \Longrightarrow f_{4} = 3.4954 \times 10^{7} \text{ pa}$$

$$\varepsilon_{5} = 0.00255 \quad m/m \Longrightarrow f_{5} = 3.650 \times 10^{7} \text{ pa}$$



شكل17-6- منحني تنش-كرنش تكمحوري فشاري بتن تعريف شده در ANSYA

2-2-3-6 تقويتها و صفحات فولادي

همانطور كه قبلا" بدان اشاره شد, براي مدلكردن ميلگردهاي فولادي از المان Link8 با در نظر گرفتن رفتار ايزوتوپيك خطي براي آن, استفاده ميشود, مشخصات ميلگردهاي فولادي نظير مدول الاستيسيته، تنش تسليم و ضريب پواسون براي مدل المان محدود مشابه مشخصات مورد استفاده در آزمايش در نظر گرفته شد.

	- مشخصات فولاد	جدول 6- ?	
	Es GPa	f _y MPa	V
مشخصات فولاد	200	47.	۰/٣

به طور كلي دو نوع رفتار تعريف شده, براي مدل المان محدود ميلكردها به قرار زير مي*ب الشد*[51].

1- رفتار خطي: مانند بتن ابتدا رفتار فولاد همسانگرد در نظر گرفته شده و تنها مدول الاستيسيته و ضريب پواسون آن تعريف ميشود.
 2- رفتار چند خطي ايزوتروپيك: در اين مدل رفتاري، فولاد به صورت دو خطي و الاستوپلاستيك ايده آل در نظر گرفته ميشود و در كشش و فشار يكسان عمل مىكند(شكل(6-19)).



شكل-19-6- منحني تنش - كرنش فولاد تعريف شده در ANSYA

شكل6-18- منحني تنش - كرنش فو لاد [49]

صفحات فلزي نصب شده در موقعيت تكيهگاهها و نقاط بارگذاري به عنوان مواد ايزوتروپيك خطي با مدول الاستيسيته برابر مدول الاستيسيته ميلگردهاي فولادي و ضريب پواسون 0/3 تعريف ميشوند.

FRP تركيبات -3-2-3-6

Compressio

همانطور كه در فصلهاي قبل تشريح شد، مواد FRP از دو جزء اصلي الياف و رزين تشكيل شدهاند. الياف يا همان فيبرها از نوع الاستيك هستند كه بسيار مقاوم و جزء اصلي باربر در تركيب FRP محسوب ميشوند. رزين يا پليمرها مقاومت كمتري نسبت به فيبرهاي تقويتي داشته و به عنوان محيط چسباننده فيبرها, مورد استفاده قرار ميگيرند. مواد FRP به طور كلي در دسته مواد آنيزوتروپيك قرار ميگيرند, يعني خواص آنها در جهات مختلف، متفاوت است. شکل (19-6) طرحي کلي از مواد FRP را نشان ميدهد.



شكلFRP طرحي كلي از مواد FRP [49]

چنانچه در شكل مشاهده ميشود, ورق هاي يك جهته داراي سه سطح عمود بر هم از مشخصات مواد هستند. رفتار مواد مركب در مدل مورد مطالعه به صورت خطي و ارتوتروپيك در نظر گرفته ميشود. به عبارت ديگر مدول الاستيسيته، ضريب پواسون و مدول برشي در جهت اصلي با دو جهت متعامد ديگر متفاوت بوده و از ضوابط مصالح ارتوتروپيك پيروي ميكنند. پار امتر هاي مورد نياز براي مدلسازي مواد FRP در نرمافزار ANSYS عبارتند از [49]: 1- تعداد لايه ها

جدول (4-3), مشخصات مواد مركب استفاده شده در مدل مور دنظر را نشان ميدهد.

جدول6-3-6 مشخصات مواد مركب

سیستم CFRP	تعداد لايه	ضخامت mm	مقاومت کششي MPa	مدول طولي	مدول عرضي	مدول برشي	ضريب پو اسون
١	٢	1/499	۱.۴/۷	۲۸/۳	۲۸/۳	۶/٣	•/•4
٢	١	١/•٩٢	11/٣	۳۴/۱	4/9	۶/٣	•/٣۶

6-2-3-1- اختصاص دادن معيار شكست

در نرمافزار ANSYS، **3** معيار شکست لايهها بهعلاوه معيار شکست تعيين شدة کاربر³⁹ را ميتوان در بررسي تخريب لايهها به کار برد اين معيارها عبارتند از:

- 1۔ معیار شکست بر اساس ماکزیم کرنش ها
- 2۔ معیار شکست بر اساس ماکزیم تنش ہا

3ـ معیار شکست Tsai – wu, که با تعیین 9 تنش و 3 ضریب کوپلینگ تعیین میشد و د.[45] معیار شکست برای مدل مورد نظر براساس ماکزیمم تنش ها با تعیین 9 تنش در نظر گرفته شد.

6-3-3- ابعاد و هندسه مدل

تير هاي بتني مورد مطالعه با ابعادي مشابه ابعاد تير هاي آزمايشگاهي مدلسازي شدند. شکل هاي **(6-**21) و **(6-22)** مدل هندسي تير مذکور را قبل از تقويت با ورق هاي CFRP نشان ميدهد.



شكل21-6- ابعاد مدل

شکل**22-6۔** مدل هندسي تير در نرمافزار ANSYA

1⁻user written criterria



شكل**6-23-** نحوه قرارگيري تقويتهاي فولادي

در شكل**(23-6)** نحوه قرارگيري تقويتهاي فولادي براي تير مدل نشان داده شده است. در اين تحقيق از لغزش آرماتورها صرف نظر شده و پيوند بين FRP و سطح بتن كامل فرض مي شود. براي در نظر گرفتن فرضيه چسبندگي كامل, گرههاي هر المان بايد كاملا بر گرههاي المان مجاور منطبق باشند.

ورقهاي CFRP براي تقويت برشي تيرها با ضخامت**ه /** و الگوهاي **صخ ته لف** مورد استفاده قرار گرفتند. و با توجه به نمونههاي آزمايشي تقويتشده و به منظور ارزيابي برخي از پارامترهاي مؤثر در تقويت برشي از شيوههاي تقويتي مختلف در اين مطالعه بهره گرفته شد.

در اين تحقيق از مدلسازي لايه چسب صرفنظر شده و چسبندگي بين FRP و بتن به صورت كامل در نظر گرفته شد.



شكل24-6- اتصال المان ها, (a) المان هاي بتن و ميلكردهاي تقويتي؛ (b) المان هاي بتن و FRP[49]

4-3-6 شبكهبندي مدل

انتخاب تراكم شبكه يكي از مهمترين مسائل در مبحث مدلسازي با نرمافزار هاي مختلف المان محدود است. زيرا همگرايي نتايج زماني حاصل ميشود كه تعداد مناسبي از المانها, مورد استفاده قرار گيرد. شكل**(6-25)** نمودار دقت نتايج با توجه به تعداد المانها را نشان ميدهد. همانطور كه از نمودار بر ميآيد با افزايش تعداد المانها، دقت تقريب در مدل اجزاء محدود افزايش مييابد, اما افزايش بيشتر تعداد المانها اثر ناچيزي بر روي دقت نتايج خواهد داشت.



شکل25-6- تاثیر تعداد المانها در دقت پاسخ به دست آمده در روش اجزاء محدود[56]

در مدل المان محدود تير مورد بحث، چند نوع شبكهبندي با تعداد المان هاي مختلف به منظور تعيين تعدين تعدين تعدين تعدين تعدين المان بررسي شد. نتايج اين بررسي ها در شكل (6-26) نشان داده شده است.



شكل26-6- تغيير مكان وسط دهانه براساس تعداد المانها

مشاهده ميشود كه با افزايش تعداد المانها به بيش از **1296** المان, تغيير مكان وسط دهانه تغيير چنداني نميكند از طرفي افزايش بيشتر تعداد المانها سبب ميشود كه همگرايي مسأله در بار هاي بالاتر مشكل شود, لذا مدل المان محدود شامل **1440** المان بتن براي اين تحقيق در نظر گرفته شد.

شكلهاي**(6-27)، (6-28)** و **(6-29)** شبكهبندي قسمتهاي مختلف تير را نشان ميدهند. همانطور كه مشاهده ميشود در ناحيه بارگذاري براي جلوگيري از تمركز تنش از شبكهبندي ريزتري استفاده شده است.



شكل**6-27-** شبكهبندي تير بتني



شكل**6-28-** شبكهبندي CFRP (پوشش U شكل)



شكل 29-6- شبكهبندي ميلكر دهاي فو لادي

5-3-6 بارگذاري و شرايط تكيهگاهي

مدل المان محدود در موقعيتهايي مشابه نمونههاي آزمايشي بارگذاري شد. براي جلوگيري از تمرکز تنش در محل اثر بارها و موقعيتهاي تکيهگاهي, از ورقهاي فولادي به ابعاد تقريبي 0/127*0/0137*0/012 در محل اثر بارها, و 0/0225*0/0225 0/02 در محل تکيهگاهها استفاده شد.

اشكال (30-6) و (31-6) شرايط تكيه گاهي مدل را نشان ميدهند.



شكل6-30- شرايط تكيه كر اه مدل



شكل**6-31-** موقعيت ورق هاي فولادي در محل دو تكيه **گا 0** و زير بار ها

در محل تكيهگاهها براي ايجاد قابليت چرخش تير، قيدهاي تكيهگاهي فقط در يك رديف تعريف ميشوند.



شكل**6-32-** نحوه اعمال قيدهاي تكيه **ك ا ٥**ي

مطابق شکل**(6-33)** چنانچه از چرخش ورق تکيهگاهي جلوگيري شود, تركهاي موضعي در آن محل به وجود ميآيد.



شكل6-33- تغيير مكان مدل, (a) بدون چرخش صفحه فو لادي؛ (b) با چرخش صفحه فو لادي

6-4- روش تحليل

يكي از مسائل مهمي كه در مبحث بتنآرمه همواره مورد توجه بوده, رفتار متفاوت بتن تحت اثر بارهاي خارجي به علت خواص غير خطي و مقاومت كششي كم آن است. در شروع بارگذاري، به علت پايين بودن مقدار تنشهاي كششي و فشاري در بتن، قطعه به صورت الاستيك و خطي عمل ميكند. در تحليل خطي رفتار سازه را در اين ناحيه مي پندارند. در اين بازه ماتريس هاي مواد و سختي ثابتند و بارگذاري بر روي آنها اثري ندارد. در برابر آن غير خطي بودن رابطه تنش-كرنش سبب تغيير ماتريس مواد مي شود. به عبارت ديگر اين ماتريس تابعي از تغيير مكان هاي گرهي است. در نتيجه معادله حاكم بر رفتار سازه به صورت غير خطي در مي آيد. مواد و فولاد نرم داراي رفتار غير خطي هستند.

در تحليلهاي غير خطي، كل بار خارجي در چند قسمت كوچك تحت عنوان گامهاي بارگذاري بر سازه وارد ميشود. روشهاي گوناگوني براي حل دستگاه معادلات غير خطي وجود دارد كه از آن جمله ميتوان به فن تكراري نيوتن رافسون اشاره كرد. نرم افزار ANSYS نيز در تحليلهاي غير خطي از اين روش استفاده مينمايد. در روش مذكور، تحليل غيرخطي با يك مجموعه از تحليلهاي خطي صورت ميگيرد. نخستين تحليل، زير اثر بار خارجي وارد به سازه انجام ميپذيرد. در تحليلهاي بعدي، نيروي ناميزان (اختلاف نيروي خارجي نخستين و نيروي داخلي كنوني) وارد تحليل ميگردد. هر گام تحليل، يك گام تكراري خواهد بود. لازم است توجه شود كه تغيير مكان به دست آمده در هر تكرار، با مجموع تغيير مكان تحليلهاي پيشين جمع ميگردد. تكرارها تا زماني ادامه مييابند كه نيروي ناميزان از مقدار مشخصي كمتر شود. به اين مقدار خط گويند[57]. شكل(34-6) كاركرد اين روش را نشان ميدهد.



شكل6-34- فن تكراري نيوتن رافسون [57]

تحليل مدل مورد نظر نيز به روش تحليل غير خطي هندسي استاتيكي انجام شد. در اين روش نرمافزار بار را به تدريج افزايش ميدهد تا جاييكه سازه به مرز ناپايداري ميرسد. در اين حالت فعال كردن الگوريتم گام زماني خودكار و دو نيمهسازي در حل قوياً توصيه ميشود. الگوريتم گام اتوماتيك زماني به طور خودكار به دنبال بار ميگردد، در صورتيكه بار خطي در تحليل استاتيكي غير خطي اعمال شده باشد، و اين الگوريتم نيز فعال باشد، هنگام حل مساله در صورتيكه همگرايي در نقطهاي از بارگذاري ارضاء نشود، الگوريتم به طور خودكار نمو بارگذاري تعيين شده را نصف كرده و حل را دوباره ادامه ميدهد تا جاييكه با اعمال كوچكترين نمو در بار همگرايي ايجاد نشود. براي حل عددي مسائل غير خطي بايد به موارد زير توجه شود.

١- المان بندي مدل با دقت انجام شود، المان هاي با اخطار هاي مربوط به شكل المان ميتواند منجر به واگرايي در يک مساله غير خطي شود.
 2- تعداد نمو هاي بار متناسب با شرايط مساله به اندازه کافي انتخاب شود.
 3- انحر اف ها(تلر انس ها)، نوع المان انتخاب شده، و مبناي همگرايي نيز در برخي موارد ميتواند عاملي در همگرا شدن يا نشدن يک مساله غير خطي باشد[46].

براي آناليز، دو معيار همگرايي نيرو و تغيير مكان مورد استفاده قرار گرفت. در ابتداي حل، حدود تلرانس همگرايي همان مقادير پيش فرض ANSYS در نظر گرفته شد, اما پس از ايجاد ترك، همگرايي براي آناليز غيرخطي با معيار هاي قراردادي بسيار مشكل بود, لذا همگرايي نيرو حذف شده و همگرايي تغيير مكان افزايش يافت.

5-6- مقايسه نتايج

در اين بخش نتايج حاصل از آناليز المان محدود مورد بررسي قرار ميگيرند. موارد ارزيابي شده به شرح زير ميباشند.

۱- نمودار بار-تغيير مكان وسط دهانه
 ۲- نمودار بار-كرنش در محلهاي انتخابي

۳- توزیع ترك در طول بارگذاري
 ۴- تعیین بار شكست

1-5-6- مقايسه نتايج حاصل از آناليز المان محدود و نتايج آزمايشگاهي

ابتدا براي تأييد صحت نتايج حاصل از آناليز المان محدود, تيرهاي آزمايشگاهي در نرمافزار ANSYA مدل شدند. تغيير مكان مدلها, در موقعيتي مشابه تيرهاي مذكور (وسط دهانه), اندازهگيري شد. شكلهاي (**35-6**)، (**36-6**) و (**37-6**) نمودارهاي بار- تغيير مكان حاصل از نتايج آزمايشگاهي و آناليز المان محدود را براي تيرهاي كنترل، تير مقاومشده با يك لايه ورقه CFRP با زاويه الياف **±45** درجه, با عنوان U45/135 و تير مقاومشده با دو لايه ورقه CFRP با زاويه فيبر (U90), نشان مي دهد.



شكل**36-6-** نمودار بار - تغيير مكان تير U45/135



شکل**37-6۔** نمودار بار – تغییر مکان تیر U90

همانگونه که مشاهده ميشود, نمودار هاي بار - تغيير مکان حاصل از آناليز المان محدود هماهنگي خوبي با نتايج آزمايشگاهي دارند, اين هماهنگي در جدول(4-4) نيز به وضوح مشاهده ميشود.

نترل، U45/135 وU90	تیر های ک	مقايسه	-4-6	جدوا
--------------------	-----------	--------	-------------	------

	تغيير مكان نها <i>يي(</i> mm)			بار نھايي(kN)			درصد افز ایش مقاومت برشی نسبت به تیر کنترل(%)	
ىير	ANSYS	آزمايش	اختلاف(%)	ANSYS	آزمايش	اختلاف(%)	ANSYS	آزمایش
کنترل	۴/۵	۸/۰۲۱	۲۸/۲۴)) Y	1.9/80	٩/١٨	-	-
U45/135	9/471	٩/٦٧	1/99٣	۱۹۳	١٩١	١/•۴٧	94/90	V4/94
U90	٩/٣	۱۴/۶	۵۷	147	141	•/?٨	۲۶/۵	84/41

همانطور كه در هر سه شكل مشهود است, تير مدل شده در روش المان محدود از تير واقعي سختتر ميباشد. دو عامل مؤثر در بالاتر بودن سختي مدل المان محدود نسبت به تير هاي واقعي را به صورت زير ميتوان تشريح نمود.

1- تركهاي ريز ايجاد شده به دليل انقباض ناشي از خشك شدن بتن كه باعث كاهش سختي تيرهاي واقعي ميشود و در مدل المان محدود منظور نمي كردد.

2- در نظر گرفتن فرضيه پيوند كامل بين بتن و آرماتور هاي فولادي در مدل هاي المان محدود كه در تير هاي واقعي صادق نيست و با لغزش آرماتور ها عملكرد تركيبي بتن و فولاد در اين تير ها از بين مي رود.

شكل**(38-6)** اختلاف رفتار بار- تغيير مكان حاصل از نتايج آزمايشگاهي و مدلسازي ANSYS را براي سه تير معرفي شده, نشان ميدهد. همانطور كه ملاحظه ميشود, سختي تير ها قبل و بعد از مقاومسازي با FRP در ناحيه خطي مشابه هستند. پس از ايجاد تركهاي اوليه تير هاي مقاومشده با FRP داري سختي بيشتري نسبت به تير كنترل هستند كه با نتايج آزمايشگاهي نيز سازگار است.



شكلU45/135 مقايسه نمودار بار – تغيير مكان تير هاي كنترلU45/135 وU90: الف) بر اساس نتايج آزمايشگاهي, ب) بر اساس نتايج ANSYS

2-5-6- ارزیابی اثر ضخامت بر تقویت برشی تیرها

همچنانكه پيش از اين نيز بدان اشاره شد, ضخامت FRP از عواملي است كه ميتواند در تقويت برشي تيرها مؤثر باشد. نتايج آزمايشهاي مختلف انجام شده نيز گوياي اين مطلب است. در اين قسمت براي ارزيابي اثر اين پارامتر با استفاده از روش آناليز المان محدود از سه نمونه تير مقاوم شده با 2 لايه ورقCFRP سيستم 2, با ضخامتهاي 0/546, 1092 و 1/098 ميليمتر براي هر لايه با جهت الياف 90 درجه به ترتيب با عنوان تير (1-190), (2-190) و (1-900) بهره گرفته شد.

اشكال(**39-6)، (40-6)** و (**41-6)** مدل هندسي, نحوه مشيندي و جهت الياف در هر لايه را براي سه تير مذكور نشان ميدهد.





شكل**6-39-** مدل هندسي تير هاي مقاومشده با پوشش U شكل

شكل40-6 شبكهبندي تير هاي مقاومشده با پوشش U شكل



شكلU90-2 , U90-1 و تير هاي U90-2 و U90-2 و U90-3 و

6-2-5-1- نمودار بار-تغيير مكان

شكل (42-6) مقايسه رفتار بار-تغيير مكان تير هاي (1-U90), (2-U90) و (3-U90) را نشان ميدهد. همچنانكه ملاحظه مي شود, با افزايش ضخامت تقويت بر شي تأمين شده توسط FRP به تدريج بهبود مي يابد.



شكل42-6- مقايسه نمودار بار-تغيير مكان تير هاي كنترل,1-U90, 2-U90 و 3-U90 بر اساس نتايج ANSYS

6-2-2-2 كرنش كششي در ميلگردهاي فولادي

براي تيرهاي (1-U90), (U90-2) و (U90-3) كرنش ميلكردهاي كششي در وسط دهانه با استفاده از دادههاي نرمافزار ANSYS ارزيابي شدند. مقايسه نمودار بار-كرنش كششي براي ميلكردهاي فولادي اصلي، براي 3 تير مذكور را در شكل(**43-6)** ميتوان ملاحظه نمود.



شكل6-43- مقايسه نمودار بار-كرنش

همانطور كه مشاهده ميشود, با افزايش ضخامت CFRP، ميلگردهاي كششي در لحظه تسليم, بار بيشتري را تحمل ميكنند, اما اين ميزان افزايش بسيار ناچيز است.

بدين ترتيب ملاحظه ميشود كه در تير بتني داراي رفتار ارتوتروپيک، تقويت در يک جهت بر جهت ديگر نيز اثرگذار است اما ميزان تأثير تقويت بر جهات ديگر ناچيز و قابل اغماض ميباشد. اين پديده ميتواند به علت محدود شدن گسترش و بازشدگي ترکها به سبب حضور FRP باشد.

نتايج مطالعات نشان ميدهد كه كرنش ميلگردهاي كششي بدست آمده از روش المان محدود و كرنشهاي واقعي تيرهاي آزمايشگاهي در محدوده خطي هماهنگي بسيار خوبي با هم دارند, اما پس از ترک خوردگي بتن، ناهماهنگي بين نتايج حاصل، مشاهده مي شود. به طور كلي، كرنشهاي موجود در ميلگردهاي كششي, در اين ناحيه براي مدل المان محدود بيشتر از مقادير به دست آمده از تيرهاي آزمايشگاهي است.

در یک تیر بتنآرمه در یک بار به اندازه کافي بزرگ، بتن مقاومت کششي خود را از دست داده و همانگونه که در شکل(**44-6***a*) مشاهده مي شود, ترکهايي در ناحيه کششي تير رخ مي دهد. بين ترکها، بتن مقداري مقاومت کششي تير رخ مي دهد. بين ترکها، بتن مقداري مقاومت کششي تير رخ مي دهد. بين در داده همانگونه که در شکل(**44-6***b*) نشان ترکها، بتن مقداري مقاومت کششي به وسيله تنش پيوستگي در جهتي که در شکل(**6**-**44**) نشان داده شده, از خود نشان مي دهد. اين عمل سبب کاهش تنش کششي در فولاد تيرهاي واقعي شکل(**6***b*) مي دود (44) مي دهد.



شكل**6-44-** تغييرات نيروي كششي در فولاد, براي تيرهاي بتنآرمه واقعي, a) نمونه ترك, b) مقطع بتني تركخورده, c) تنشهاي پيوستگي در ميلگردهاي تقويتي, b) تغييرات نيروي كششي در فولاد [**49**]

شكل(6-45) كسترش نيروي كششي را در فولاد, براي مدلهاي المان محدود نشان ميدهد. در مدل المان محدود تركها به صورت پخشي در نظر گرفته ميشوند. در روش ترك پخشي، تركها در سرتاسر ناحيهاي كه تنشهاي كششي اصلي در المانهاي بتن از مقاومت نهايي آن بيشتر ميشود، كسترش مييابند(شكل (6-44ه) و (4**6-44)).** در اين حالت سختي بتن تركخورده به سمت صفر ميل نموده و ديگر قادر به تحمل نيروهاي كششي نميباشد. بنابراين كشش در المان فولادي براي مدل المان محدود مانند تيرهاي و اقعي متغير نبوده و مطابق شكل (6-45) در امتداد المان, ثابت است. به همين دليل همواره كرنشهاي ايجاد شده در مدل المان محدود بيشتر از كرنشهاي و اقعي اندازهگيري شده خواهد بود.



شكل**6-45-** تغييرات نيروي كششي در فولاد, براي مدل المان محدود, a) نمونه ترك, b) مقطع بتني تركخورده, c) تغييرات نيروي كششي در فولاد [**49**]

3-2-5-6 تنش در میلگردهای کششی فولادی

شكل (46-6) نمودار تنش- كرنش را براي تير مدل 3-U90 با استفاده از نتايج ANSYS نشان ميدهد. همان طور كه مشاهده مي شود, اين نمودار از همان منحني تنش-كرنش الاستو پلاستيك ايده آل فولاد تبعيت ميكند. در ساير مدل ها نيز همين رفتار مشاهده شد.



شكل-46-6 نمودار تنش-كرنش ميلكردهاي كششي در تير 3-U90

4-2-5-6- بار ترک خوردکي اوليه و گسترش ترکها

بار تركهاي اوليه در مدل المان محدود, كام باري است كه نشانههاي اوليه ترك خوردكي در تير ظاهر ميشود. شكل**(47-6)** تركهاي اوليه ايجاد شده در تيرهاي (1-U90), (2-U90) و (3-U90) را نشان ميدهد.



شكل**47-6-** ترك هاي اوليه ايجاد شده در تير هاي (1-U90), (2-U90) و (U90-3)

معمولا بار تركخوردگي اوليه نتيجه شده از برنامه ANSYS بيشتر از مقدار به دست آمده از تير واقعي است كه ميتواند به دليل همگن بودن نسبي مدل المان محدود در مقايسه با تير هاي آزمايشگاهي باشد.

در نرمافزار ANSYS، خروجي هاي المانSolid65 نظير تنشها، كرنشها و... در نقاط انتكرال گيري محاسبه مي شوند. شكل **(48-6)** نقاط انتكرال گيري المان بتن را نشان مي دهد. علامت هاي مربوط به تركخور دكي نيز در اين نقاط ظاهر مي شوند. اين علائم به صورت دايره هايي عمود بر جهت تنش اصلي، مطابق شكل **(49-6)** به وجود مي آيند.

شكل(6-06) به طور نمونه تركها را در مدل المان محدود تير (2-190) نشان ميدهد. همان طور كه در شكل(50-6a) مشاهده مي شود, در وسط تير تنشهاي كششي در جهت x بوده و بنابر اين دو اير مشخص كننده ترك عمود برجهت x ظاهر مي شوند. اين نوع ترك ها بيان گر تركهاي خمشي هستند. شكل(50-6b) نشان دهنده نمونه تركها در زير محل بارگذاري است. براي سازه بتني در معرض فشار تك محوري تركها اساسا موازي جهت بار فشاري وارده گسترش مييابند، اين تركها از كرنشهاي كششي توسعه يافته به دليل اثر پو اسون نتيجه مي شوند. رفتار مشابهي در مدل هاي المان محدود مشاهده مي شود. بارهاي در جهت z در نتيجه اثر پو اسون، كرنش هاي كششي در جهت y ايجاد ميكنند. اين تركها مبين تركهاي فشاري وسون، كرنش هاي كششي در جهت y ايجاد



شكل6-48- نقاط انتكر الكيري المان بتن



شكل**6-49-** نمونه ترك

در موقعيت نشان داده شده در شكل (50-6c) تنشهاي كششي نرمال، در جهت x و تنشهاي برشي در صفحه x گسترش مييابند. در نتيجه جهت تنشهاي اصلي كششي از جهت افق متمايل ميشود. زماني كه تنشهاي كششي از جهت افق متمايل ميشود. زماني كه تنشهاي كششي در مايد، دايره اي مورب به صورت خط راست عمود بر جهت تنشهاي اصلي در نقاط انتگر الگيري ظاهر ميشوند. اين دواير اشاره به ترکهاي كششي قطري دارند.



شكل**6-50-** نمونه تركهاي ايجاد شده در مدل المان محدود تير (2-U90**): a)** تركهاي خمشي, b) تركهاي فشاري, c) تركهاي قطري كششي

به طور كلي در تيرهاي مدل، ابتدا تركهاي خمشي در وسط دهانه تير ظاهر شدند, سپس با افزايش بار، تركهاي خمشي عمودي به صورت افقي از وسط دهانه به سمت تكيهگاهها گسترش يافتند و در بارهاي اعمالي بالاتر، تركهاي قطري به وجود آمدند. و در نهايت افزايش بار وارده تركهاي خمشي و قطري اضافي را القاء نمود كه منجر به شكست تير شد. شكل (6-51)گسترش تركها در تير (2-10) را نشان ميدهد.

FRP- بررسي اثر زاويه الياف بر روي مقاومت برشي تيرهاي تقويت شده با

يكي از مهمترين پار امتر هاي اثر گذار در تقويت اعضاء ساز هاي با تركيبات پليمري FRP، زاويه الياف نسبت به محور طولي تير ميباشد. بر اين اساس به منظور بررسي اثر اين پار امتر در تقويت برشي تير ها از دو تير مقاوم شده با صفحات ممتد CFRP به صورت پوشش U شكل مشابه شكل (6-25) و با زاويه الياف ⁶4± (135-44) و [°]90 (190) بهر ه گرفته شد. مطابق نمودار هاي بار-تغيير مكان حاصل از نتايج آناليز المان محدود (شكل (6-53)) مشاهده مي شود كه حداكثر بهر موري زماني حاصل ميگر دد كه جهت الياف عمود بر امتداد تركخور دگي باشد. به عبارت ديگر, نمونه مقاوم شده با زاويه الياف مقاومت بر مي اين مودار مرومي بر مونه تير دارد. جدول (6-55) مقايسه نتايج حاصل نشان ميدهد.



شكل**6-51-** گسترش تركها در تير (U90-2)



شكلU45-135 مدل هندسي تير هاي U45-135 و U90



شكل**6-53-** نمودار بار - تغيير مكان تير هاي كنترل, U45-135 و U90

تير	تغيير مکان نهايي mm	بار نهايي kN	درصد افزایش مقاومت برشي نسبت به تیر کنترل(%)
كنترل	٨/•٢١	1.9/80	-
U45-135	٩/۴٨١	١٩٣	N1/90

U90	18/.509	14.	79/41Y
-----	---------	-----	--------

6-3-5-1- گىىترش تركھا

شكل**(54-6)** گسترش تركها در تير ₁35-U45 را در مقايسه با تير مقاوم نشده نشان ميدهد. خطهاي قرمز رنگ تركهاي اوليه و خطهاي مشخص شده با رنگ سبز و آبي بازشدگي بيشتر ترك را مشخص مىكنند.

همانطور كه ملاحظه ميشود تركها در تير مقاوم نشده از گسترش بيشتري نسبت به تير مقاوم شده برخوردارند.





ب-تير U45-135

شكل**6-54-** گسترش تركھا

4-5-6- بررسي اثر الكوهاي مختلف تقويتي بر مقاومسازي برشي

به منظور بررسي اثر اين پارامتر, از سه تير مقاومشده با ورقهاي FRP با الگوي دورپيچ كامل, مطابق شكل (6-55 الف), با عنوان تير (w45/135)، الكوي تقويتي روي وجوه جانبي تير (845/135) مطابق با شکل (55-69ب) و تیر U45/145، بهره گرفته شد. در همه نمونه ها سیستم FRP از نوع f و با زاویه الیاف °**45±** مورد استفاده قرار گرفت.



(الف)


(ب)

شكل**6-55-** شكل هندسي ونحوه مشر ، مدي تير مقاومشده با الف) دور بيچ كامل FRP, ب)نصب روي دووجه جانبي

6-5-4-1- نمودار بار-تغيير مكان

شكل **(6-66)** نمودار بار-تغيير مكان تيرهاي مذكور را نشان ميدهد. همان گونه كه مشاهده مي شود تير مقاوم شده با دورپيچ كامل FRP، مؤثر ترين الكوي تقويتي است و تير مقاوم شده با نصب FRP روي وجوه جانبي كمترين تاثير را در افزايش مقاومت بر شي دارد. كه اين نتيجه مشابه نتايج به دست آمده از مطالعات آزمايشگاهي است. جدول **(6-6)** مقايسه بار هاي نهايي سه تير, با تير كنترل را نشان مي دهد.

تير	تغيير مکان نهايي mm	بار نهايي KN	درصد افز ايش مقاومت برشي نسبت به تير کنترل(%)
كنترل	٨/•٢١	1.9/80	-
W45-135	٧/٩٥٢	۲.,	۸۸/۲۴
U45-135	٩/۴٨١	۱۹۳	۸۱/۶۵
S45-135	١٣/٨٠٨	126/190	√٣/٣۶

جدول**6-6-** مقايسه بار نهايي تير هاي كنترل W45-135, W45-135, بر اساس نتايج ANSYS



شکل**6-56-** نمودار بار - تغییر مکان

FRP - 2-4-5-6 حطوط همتراز تنش در بتن و

در شکلهاي **(57-6)** تا **(62-6)** خطوط همتراز تنش در جهت محور طولي، در تير بتني و ورق FRP سه تير مذکور آورده شده است.







شکلFRP کانتور تنش در FRP در تیر 135-545



شکل**5-59-** کانتور تنش در بتن در تیر W45-135



شکل **60-6-** کانتور تنش در FRP در تیر 135-W45



شکل61-64- کانتور تنش در بتن در تیر 135-U45



شکل FRP- کانتور تنش در FRP در تیر 135-U45

همچنان كه ملاحظه ميگردد، ماكزيمم تنش در تير مقاوم شده با دورپيچ كامل نسبت به دو نمونه ديگر كمتر و گسترش آن نيز يكنواختتر است. همچنين تنشهاي موجود در FRP و بتن در تير مقاوم شده با نصب FRP روي وجوه جانبي(S45-135) بيشترين مقدار را نسبت به دو تير ديگر دارد، كه اين بيانگر اثر كمتر اين نوع الگوي مقاومسازي بر افزايش تقويت برشي، نسبت به دو الگوي ديگر است.

FRP - بررسي اثر دهانه برشي بر تقويت برشي تيرهاي مقاومشده با

همچنان که در فصل سوم اشاره شد، نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر () از پار امتر هايي است که در تأمين تقويت برشي توسط FRP، مؤثر است. علير غم اهميت اين پار امتر مطالعات اندکي در اين مورد به به ير در خصوص نسبتهاي کم , (2.5 >), انجام شده است. لذا در اين تحقيق، اثر اين عامل بر مقاومسازي برشي تير ها با استفاده از نرمافزار ANSYS مورد بررسي قرار گرفت. به اين منظور ابتدا دو تير مقاوم نشده با استفاده از نرمافزار CFRP مورد بررسي قرار گرفت. به اين منظور ابتدا دو تير مقاوم نشده با استفاده از نرمافزار عامل بر مقاومسازي برشي تير ها با استفاده از نرمافزار ANSYS مورد بررسي قرار گرفت. به اين منظور ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق OFRP ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي نير ها استفاده شده به در اين منظور ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق محلوم ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق OFRP ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي نير مي اير اير اير مورت بورق الايه ورق OFRP ابتدا دو تير ها استفاده شد. به دليل تغيير محل اثر بار ، مش بندي مدلها در دو نمونه متفاوت بود. براي مقاومسازي تير ها استفاده شد. به دليل تغيير محل اثر بار ، مش بندي مدلها در دو نمونه متفاوت بود براي مقايسه بهتر ، دو نمونه با تعداد محل المانهاي تير مبنا2 تير مينا2 مش بندي شدند. مدل هندسي و نحوه مش بندي دو تير در المانهاي تير مينان داده شده است.



شكل**63-64-** مدل هندسي تير با دهانه برشي a/d=2 شكل**64-64-** مشبندي تير با دهانه برشي a/d=2



شكلa/d=2 شكل هندسي تير با دهانه برشي a/d=2 مقاومشده با FRP



- شكل**67-6-** مشبندي تير با دهانه برشي a/d=1
- شكل**66-6-** شكل هندسي تير با دهانه برشي a/d=1



شکلa/d=1 شکل هندسی تیر با دهانه برشی a/d=1 مقاومشده با FRP

6-5-5-1- نمودار بار-تغيير مكان

نمودار بار-تغيير مكان تير هاي با دهان **ه اي** برشي متفاوت در اشكال (69-6)، (70-6) و (71-6) نشان داده شده است. همان طور كه ملاحظه مي گردد, هر چه محل اثر بار به تكيه گاه نزديك تر مي شود يا به اصطلاح نسبت دهانه برشي كاهش مي يابد, از اثر FRP در تأمين تقويت برشي تير ها كاسته مي شود. با توجه به نتايج به دست آمده از تحليل عددي مشخص شد, كه درصد افز ايش مقاومت برشي در تير با نسبت دهانه برشي 3 = ^{[3}/₂]، پس از مقاوم سازي با FRP، 64/95 درصد، در تير با نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر 2 = ^{[3}/₂]، 28 درصد و در تير با نسبت دهانه برشي، 1 = ^{[3}/₂]، تنها 5 درصد، است.



شكل**6-66-** نمودار بار – تغيير مكان تير با دهانه برشي a/d=1





شكلa/d=3- نمودار بار - تغيير مكان تير با دهانه برشي a/d=3(تير 135-4/

FRP- ارزيابي اثر ميلگردهاي برشي بر مقاومسازي برشي تيرها با

براي ارزيابي اثر اين پارامتر ، از نمونه فاقد ميلگردهاي برشي استفاده شد. به اين منظور ابتدا تير مقاومنشده به عنوان تير کنترل, بدون در نظر گرفتن آرماتور هاي برشي, مدلسازي و سپس اين تير با ورق CFRP به صورت پوشش u شکل مقاوم شد.

مطابق نمودار بار-تغيير مكان به دست آمده از نتايج آناليز المان محدود نشان داده شده در شكل (6-72), با حذف ميلگردهاي عرضي، اثر FRP در تأمين مقاومت برشي افزايش مييابد.



شكل72-6- شكل هندسي ونحوه مشرب مدي تير فاقد ميلگردهاي برشي

بر اساس نتايج حاصل(شكل(6-73))، ميزان افزايش مقاومت برشي تير مقاومشده با ورق CFRP در مقايسه با تير مقاومنشده در نمونه فاقد آرماتور برشي 83/08 درصد مشاهده شد، در حاليكه اين مقدار براي تير داراي ميلگردهاي عرضي با شرايط مشابه سيستم مقاومسازي برابر 64/96 درصد اندازهگيري گرديد. نتايج آزمايش هاي انجام شده در اين مورد نيز همين مطلب را خاطر نشان ميكند.



شكل73-6 نمودار بار - تغيير مكان تير فاقد أرماتور عرضي

فصل هفتم

نتيجه گيري و پيشنهاد

1-7- پیشگفتار

در تحقيق حاضر، كاربرد مواد مركب پليمري جهت تعمير و تقويت تيرهاي بتنآرمه مورد بررسي قرار گرفت. تيرهاي بتني تقويتشده با اين روش از ديدگاههاي گوناگوني ميتوانند مطالعه شوند. موضوع مورد نظر در اين تحقيق بررسي افزايش ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه تقويت شده با سيستم FRP توسط روش اجزاء محدود بوده است.

2-7- مشخصات مدلها

در اين مطالعه، ابتدا تحليل عددي نمونه تير بتني مقاومشده در برش مربوط به آزمايش نوريس، سعادتمنش و احساني، توسط نرمافزار ANSYS ارزيابي شد. مقايسه نتايج هماهنگي خوبي را بين دادههاي آزمايشگاهي و تحليل عددي نشان داد. سپس با استفاده از چند مدل عددي، پارامتر هايي همچون، اثر ضخامت FRP، زاويه الياف، نوع الگوي تقويتي، دهانه برشي و اثر ميلگر دهاي عرضي در تقويت برشي تير هاي بتنآر مه تقويت شده مورد بررسي قرار گرفت. مشخصات مربوط به نحوه مقاومسازي هر يک از اين نمونه ها در جدول (1-1) ارائه شده است.

3-7- نتيجەگىرى

با مقايسه نتايج حاصل از تحليل عددي هر يک از نمونههاي معرفي شده در جدول **(1-7)**، نتايج زير حاصل گرديد.

1- با افز ايش ضخامت FRP، ميز ان مقاومت برشي تأمين شده توسط FRP افز ايش مييابد. مطابق نمودار هاي بار- تغيير مكان بدست آمده، در صد افز ايش مقاومت برشي براي سه تير مقاوم شده با FRP با ضخامت هاي 0/546، 1/092 و 2/186 ميليمتر، مطابق شكل (7-1) مي باشد.

عنوان تير	مشخصات ورقه FRP		پارامترهاي مورد مطالعه
U90-1	پوشش U شکل با زاویه الیاف °۹۰	$t_{FRP} = \cdot/2$ % \hat{r}	
U90-2	پوشش U شکل با زاویه الیاف °۹۰	$t_{FRP} = 1/\cdot 9$ Y	ضخامت FRP
U90-3	پوشش U شکل با زاویه الیاف °۹۰	$t_{FRP} = 7/1 \Lambda \hat{\gamma}$	
U45-135	پوشش U شىكل	$\propto = \pm {}^{\varphi} \mathfrak{d}^{\circ}$	
U90	پوشش U شکل	×=۹۰°	ر او یه الیاف
W45-135	دور پېچ كامل		
U45-135	پوشش U شکل		الكوي تقويتي
S45-135	FRI روي وجوه جانبي نير		
(تیر مقاوم نشده) $rac{b}{d} = 1$ $1 = rac{b}{d}$ (تیر مقاوم شده)) شكل با زاويه الياف 4 <u>5±</u>	ຫຼັງງອໄລງ	
$(2 = \frac{a}{a}) = (2 ext{ rightarrow algorithm constraints})$ $(2 = \frac{a}{a}) = (2 ext{ rightarrow algorithm constraints})$	J شكل با زاويه الياف 45±	بر ي	

جدول7-1- مشخصات مدلها



شكل-1-7 درصد افزايش مقاومت برشي براي سه تير مقاوم شده با ضخامت متفاوت

- 2- كرنش كششي در ميلگردهاي فولادي كششي با بهبود ضخامت FRP، به علت محدود شدن گسترش و بازشدگي تركها، كاهش مييابد، اما اين ميزان كاهش بسيار ناچيز است.
 - **3-** ورق هاي FRP، با زاويه الياف 45± درجه نسبت به ورق هاي با زاويه الياف **90** درجه اثر بيشتري در بهبود مقاومت برشي تير هاي مقاوم شده با پوشش U شكل در تير هاي داراي نقص برشي دارند.



شكل**2-7-** درصد افزايش مقاومت برشي در تيرهاي U45-135 و U90

4- الكوي دورپيچ كامل FRP، مؤثرترين الكوي تقويتي است و نصب FRP روي وجوه جانبي تير كمترين تاثير را در افزايش مقاومت برشي دارد. درصد افزايش مقاومت برشي در هر يك از سه الكوي معرفي شده در جدول(1-7) مطابق نمودار ميلهاي زير مي باشد.



شكل**3-7-** درصد افزايش مقاومت برشى در الگوهاي متفاوت مقاومسازي

5- هر چه محل اثر بار به تكيهگاه نزديكتر شود و يا به اصطلاح نسبت دهانه برشي كاهش يابد, از اثر FRP در تأمين تقويت برشي تير ها كاسته ميشود. درصد افزايش مقاومت برشي در مدل هاي با دهانه برشي 3= ﷺ و 1= ﷺ مطابق نمودار زير ميباشد.



شکل4-7- درصد افز ایش مقاومت برشی در مدل های با دهانه برشی متفاوت

6- اثر FRP در نمونه فاقد آرماتور برشي بسيار بيشتر از مدل مشابه داراي آرماتور هاي عرضي است. درصد افزايش تقويت برشي تأمين شده توسط FRP در دو تير مذكور مطابق نمودار به ترتيب برابر 64/95 و 83/08 مي باشد.



شكل7-5- درصد افز ايش مقاومت برشي در مدل فاقد آرماتور برشي

4-7- پیشنهادات

همانطور كه قبلاً نيز بدان اشاره شد, استفاده از تركيبات پليمري براي مقاومسازي تيرها و دالها در خمش ونيز تقويت اعضاي فشاري موضوعاتي هستند كه تاكنون بهخوبي به آنها پرداخته شده است, ليكن عليرغم تحقيقات مناسب در اين زمينهها, مقاومسازي برشي تيرها با استفاده از تركيبات پليمري هنوزتحت بررسي بوده و نتايج بهدست آمده تاكنون كم و گاهي محافظهكارانهاند. لذا جهت انجام مطالعات تكميلي پيشنهادات زير ارائه ميگردد:

- **1-** بررسي الگوهاي مختلف مقاومسازي با استفاده از نوارهاي مجزاي FRP, به دليل صرفهجويي بيشتر در مصرف آن, در ادامه مطالعات ضروري ميباشد.
- 2- انجام مطالعات دقيقتر بر روي پارامترهايي همچون نسبت آرماتورهاي عرضي, جهت زاويه الياف, ارزيابي اثر آرماتورهاي طولي, نوع سيستم FRP و نيز مقاومت فشاري بتن در مقاومسازي برشي لازم است.
- 3- مدلسازي چسب به منظور بررسي ساير مدهاي گسيختگي نظير جداشدن FRP از سطح تير از جمله مواردي است كه پرداختن به آن ميتواند به درك بهتر رفتار سازه مقاومشده با اين روش بيانجامد.

چکيده

استفاده از کامپوزیتهای با زمینه پلیمری در مقاومسازی سازههای بتنآرمه طی سالیان اخیر از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است. کاربری آسان مواد مرکب FRP به علت داشتن وزن کم، مقاومت کششی بالا و خاصیت ضدخوردگی باعث شده است که این مواد جایگزین مناسبی برای مصالح سنتی و شیوههای متعارف موجود باشند.

در این پایاننامه سعی شده است تا با بهره گیری از نرمافزار ANSYS رفتار تیرهای بتنآرمه مقاوم شده در برش با استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف بررسی شود. برای این منظور ابتدا مدل عددی تیر بتنآرمه مقاوم نشده به عنوان تیر کنترل و تیرهای مقاوم شده با کامپوزیت های پلیمری مسلح شده با الیاف کربن(CFRP) تحت زاویه ۴۵± و ۹۰ درجه مربوط به آزمایش نانی و همکاران(۱۹۹۷) شبیه سازی شد, که نمودارهای بار- تغییرمکان به دستآمده از روش عددی هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از تیرهای آزمایشگاهی داشتند و در نهایت برخی از پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیرهای بتنآرمه نظیر جهت و ضخامت الیاف, نسبت تقویت های برشی فولادی و نسبت دهانه برشی, به کمک نرمافزار ANSYS مورد بررسی قرار گرفت.

واژگان کلیدی:

مدل اجزاءمحدود، مواد مركب(FRP)، تقویت برشی، تیر بتن آرمه

فصل اول

مقدمه

از زمانی که اولین سازهها توسط طبیعت یا ساختههای دست بشر شکل گرفتند، فرسایش یا تخریب باعث ضعف در کارآیی آنها می شد. این کاستیها قانون طبیعت هستند که حتی بر سازههای مدرن امروزی نیز اثر گذارند. سازههای مدرن از قبیل آسمانخراشها و پلها بسیار پرهزینه بوده و زمان ساخت طولانی مدت آنها گاهی باعث ایجاد اختلالاتی در جامعه میشود. از طرفی جامعه اطراف ما و در نتیجه تقاضای مورد نیاز

در مورد سازههای موجود در حال تغییر است. حمل و نقل در حال سنگین تر شدن است، سرعت وسایط نقلیه افزایش یافته و …که همه نیاز به ایجاد تغییرات تقاضا در سازههای با دامنه عمر طولانی را بیشتر می کند. همچنین علوم مربوط به رفتار سازهای گسترش یافته که خود باعث آگاهی نسبت به عدم قابلیت مناسب برخی سازههاست. بنابراین احیاء سازه جهت رسیدن به کارآیی مناسب، همواره مورد توجه بوده است. یکی از روشهای ارتقاء سازه عمدتاً برای بالا بردن ظرفیت باربری و نیز دیگر سطوح کارآیی، مقاومسازی آن میباشد. به طور کلی, مقاومسازی سازههای موجود یا مرمت آنها به منظور تحمل بارهای مضاعف طراحی، بهبود نارساییهای ناشی از فرسایش, افزایش شکل پذیری و ... با استفاده از مصالح مناسب و شیوههای اجرایی صحیح به طور متعارف انجام می گردد. استفاده از صفحات فولادی به صورت پوشش خارجی، غلافهای بتنی یا فولادی و پس کشیدگی, تعدادی از روشهای متعارف موجود می باشند. استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP)، به عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوههای موجود معرفی شده است. از ویژگیهای اصلی کامپوزیتهای پلیمری می توان مقاومت مناسب در برابر خوردگی، سادگی اجرا در محل نصب و سبکی آنها را برشمرد. همچنین این مصالح به شکلهای مختلف و در گسترهای از انواع ورقهای چند لایه کارخانهای گرفته تا ورقههای خشک قابل پیچش روی اشکال مختلف سازهای قابل دسترس میباشند. لیکن امروزه تعداد قابل توجهی از آزمایشها و تحقیقات علمی به کاربرد این مصالح در مقاومسازی اختصاص دارد که این رشد فزاینده شاهد رویکرد و اهمیت این فناوری نو می باشد.

در سالهای اخیر, تلاشهای فراوانی جهت درک و ترویج استفاده از ترکیبات پلیمری برای مقاومسازی و بهسازی سازههای بتنی انجام شده است که به دنبال گسترش حوزه کاربرد این مصالح در تقویت اعضای مختلف سازههای بتنآرمه و به منظور کاربردی نمودن این دانش فنی, روشهای طراحی و دستورالعملها و آییننامههای محاسباتی و اجرایی تدوین گردیدند که از آن جمله میتوان به آییننامههای ACI 440R آمریکا, CSA کانادا و fib اروپا اشاره نمود.

استفاده از ترکیبات پلیمری برای مقاومسازی تیرها و دالها در خمش ونیز تقویت اعضای فشاری موضوعاتی هستند که تاکنون بهخوبی به آنها پرداخته شده است, لیکن علیرغم تحقیقات مناسب در این زمینهها, مقاومسازی برشی تیرها با استفاده از ترکیبات پلیمری هنوزتحت بررسی بوده و نتایج بهدست آمده تاکنون کم وگاهی محافظه کاران هستند.

با توجه به رشد کاربرد مصالح تقویتی پلیمرهای الیافی در کشور و تقاضا برای استفاده از این فناوری به منظور مقاوم سازی سازههای بتنی اقدام به تهیه این پایاننامه گردید که اهداف آن شامل:

بررسی نحوه مقاومسازی برشی تیرهای بتنآرمه با استفاده از صفحات پلیمری
بررسی فواید و نقطه ضعفهای استفاده از ترکیبات پلیمری برای مقاومسازی برشی تیرها
ارزیابی روش المان محدود درآنالیز رفتار تیرهای تقویت شده با صفحات پلیمری در برش

- بررسی و ارزش گذاری موضوع برای تحقیقات آینده

این مجموعه در ۶ فصل تهیه شده که به منظور ارائه دید کلی در مورد آن، فصول مربوط، با توصیف مختصر محتوی در زیر آورده شده است.

- در فصل دوم خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرهای الیافی, مراحل آمادهسازی سطح بتن و نصب کامپوزیتهای پلیمری و پلیمرهای الیافی متداول به اجمال بررسی می شوند.

– در فصل سوم ابتدا مختصری در مورد تقویت خمشی تیرها و مکانیزمهای شکست خمشی بحث شده و سپس تقویت برشی تیرهای بتنآرمه با پلیمرهای الیافی شامل الگوهای مختلف تقویت، پارامترهای مؤثر در تقویت برشی و مکانیزمهای شکست تیرهای تقویت شده تشریح می شود.

– افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیرهای تقویت شده، بستگی به انتقال تنشهای پیوستگی ایجاد شده بین کامپوزیتهای الیافی و بتن دارد, لذا در فصل چهارم پیوستگی پلیمرهای الیافی، انواع شکست پیوستگی، روابط تنش پیوستگی و برشی-لغزش و روابط پیوستگی ارائه شده توسط محققین مختلف شامل مقاومت پیوستگی و طول مهاری مؤثر بررسی میشود.

– درفصل پنجم به تشریح خلاصه روشهای ارائه شده توسط محققین مختلف برای پیشبینی ظرفیت برشی تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با FRP پرداخته میشود.

– در فصل ششم ابتدا مدل عددی تیر بتنآرمه مقاومنشده به عنوان تیر کنترل و تیرهای مقاومشده با کامپوزیتهای پلیمری مسلح شده با الیاف کربن(CFRP) تحت زاویه ۴۵± و ۹۰ درجه مربوط به آزمایش نانی و همکاران(۱۹۹۷) شبیه سازی شده, سپس برخی از پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیرهای بتنآرمه نظیر جهت و ضخامت الیاف, نسبت تقویتهای برشی فولادی و نسبت دهانه برشی به کمک نرمافزار ANSYS مورد بررسی قرار می گیرد.

- فصل هفتم شامل نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای مطالعات تحقیقی بیشتر در زمینه تقویت برشی تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با کامپوزیتهای پلیمری الیافی می باشد.

- در پیوست موضوعات عمومی در به کارگیری نرمافزار ANSYS ارائه می شود.

فصل دوم

آشنایی با مواد پلیمری الیافی

۲–۱– پیشگفتار

استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف یا FRP در بهسازی و مرمت سازهها طی ۵۰ سال اخیر از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است, که دلیل عمده آن نیاز به افزایش عمر بهرهبرداری و ارتقای اساسی زیرساختها در تمامی نقاط دنیا میباشد.

استفاده کاربردی از مواد FRP به سالهای جنگ جهانی دوم برمی گردد. در آن زمان از FRP به عنوان یک ماده پلیمری در سـاخت سازههای نظامی استفاده میشد. پس از جنگ جهانی ابتدا FRP به صورت یک جسم شیشهای جامد برای ساخت چوب ماهی گیری و گلف، پایه پرچم و چوب اسکی و ... مورد استفاده قرار می گرفت. به تدریج به دلیل مقاومت کشـشـی و فشاری بالا و همچنین قابلیت نارسایی الکتریکی در ساخت تجهیزات الکتریکی به کار رفت. سـهولت در تولید و امکان دستیابی به شکلهای پیچیده این ترکیبات نسبتا گران موجب شد که به سرعت جای خود را در میان طراحان باز کند. در سال ۱۹۶۵ تکنولوژی FRP با تولید رزینهای مخصوص گسترش یافت. پس از آن در اروپا از سیستمهای FRP به عنوان جایگزینی برای ورقهای فولادی متصـل شده به نواحی کششی قطعات بتنی جهت افزایش مقاومت خمشی استفاده شد. تحقیقات در این زمینه تقریباً از سـالهای ۱۹۳۰ به بعد در آمریکا آغاز شـده بود. ولی بررسی جدی این مسأله به اواسط این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستونهای بتنی استفاده شد. پس از وقوع در زلزله Hyoken Nanbu در سـال ۱۹۹۹ اسـتفاده از این مواد به طور قابل ملاحظهای در این کشور افزایش یافت. در سوئیس برای اولین بار FRP در تقویت پلهای بتنی به کار گرفته شد[۱].

۲-۲- کاربرد و شرایط استفاده

سیستمهای FRP میتوانند به منظور بازسازی یا حفظ استحکام یک عضو سازهای فرسوده، مرمت یا مقاومسازی عضو سازهای سالم به منظور تحمل بارهای افزایشیافته به سبب تغییر در کاربری سازه و یا جبران خطاهای طراحی و اجرا, به کار روند. این سیستمها با نصب برروی سطح دالها، تیرها و ستونها در ساختمانهای مسکونی، تجاری، صنعتی، و تکیهگاههای ماشینآلات تاسیسات سنگین, سازههای آبی از قبیل، کانالها، پلها، مخازن و منابع آب و مایعات، سیلوها و برجهای خنک کننده مورد استفاده قرار می گیرند. برای استفاده از سیستم FRP در پروژرههای خاص، لازم است وضعیت موجود سازه از قبیل ظرفیت باربری، شناسایی نقایص و عوامل آن و شرایط سطوح بتن ارزیابی شود. ارزیابی کمّی میتواند شامل بازرسی دقیق میدانی و اخذ اطلاعات لازم، مروری بر مدارک طراحی موجود سازه اجرا شده و تحلیل سازه باشد[۲].

FRP – مواد تشکیل دهنده FRP FRP نوعی ماده کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین از جنس پلیمر احاطه شده است.



شکل(۲-۱) اجزای تشکیل دهنده FRP [۳]

۲-۳-۱- رزینهای
طیف گستردهای از رزینهای پلیمری شامل اندودها، خمیرها، پرکنندهها، بتونهها و چسبها در سیستمهای طیف گستردهای از رزینهای پلیمری شامل اندودها، خمیرها، پرکنندهها، بتونهها و چسبها در سیستمهای FRP استفاده میشوند. از جمله متداول ترین رزینها میتوان به اپوکسیها، وینیل استرها و پلی استرها اشاره کرد که در گستره وسیعی از شرایط محیطی به کار میروند. از مهم ترین خواص این رزینها میتوان به مقاومت بالا، قابلیت چسبندگی عالی به بسیاری از مواد همچون فلزات، بتن, چوب، شیشه، سرامیک, مقاومت مقاومت بالا، قابلیت چسبندگی عالی به بسیاری از مواد همچون فلزات، بتن, چوب، شیشه، سرامیک, مقاومت شیمیایی بالا به ویژه در محیطهای قلیایی و ... اشاره نمود [۴].
متعنی این از فیبر تقویتی به ماده مجاور
محافظت از فیبر در برابر شرایط محیطی

۲-۳-۲ الياف

الیاف اصلی ترین عنصر در سیستم FRP است که سختی و مقاومت این سیستم را تشکیل داده و بالاترین کسر حجمی را در ساختار آن در بر می گیرد.

عملکرد الیاف تقویتی بستگی به جهت قرار گیری الیاف، طول، شکل، جنس و ترکیب آن با رزین پلیمری دارد. بنابراین انتخاب صحیح هر یک از این مشخصهها تأثیر بسزایی در خصوصیات مختلف آن نظیر جرم مخصوص، استحکام کششی، مدول کششی, استحکام فشاری، مکانیزم شکست، قیمت و دیگر خواص آن خواهد داشت.

عمده ترین الیاف مصرفی در ساختار سیستم FRP, شیشه، کربن و آرمید میباشد که در ادامه هر یک به اختصار تشریح می شوند [۵].

۲-۳-۲-۱- الیاف شیشه

این الیاف بالاترین حجم مصرف را دارند. و عمومی ترین نوع الیاف مصرفی در ساختار مواد مرکب میباشند. قیمت نسبتاً پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایق (حرارتی ـ الکتریکی) از جمله مزایای این الیاف میباشد. همچنین وجود خواصی مانند شکنندگی، مقاومت خستگی نسبتاً پایین، مدول نسبتاً پایین در مقایسه با دیگر الیاف و حساسیت به سایش موجب محدودیت در استفاده از آنها میشود. انواع اشکال موجود الیاف شیشه عبارتند از: الیاف به صورت نخ (yarn)، رشتهای (roving)، پارچهای در انواع بافت ها (ساده، زاویهدار، چند لایه زاویهای در وزنهای مختلف)، سوزنی و نمدی (با الیاف به طول ۲۵ ۲۵ و الیاف بلند پیوسته)، نواری و به صورت سه بعدی (ترکیبی از سوزنی، پارچه زاویهدار و رشتهای) [۵].

۲-۳-۲-۲ الیاف آرامید

این الیاف در دهه ۷۰ میلادی وارد بازار شدند و دارای ترکیبات عالی آروماتیک از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن (پلی آمید آروماتیک) میباشند. همچنین از طریق ریسندگی محلول پلیآمید با زنجیره بلند تهیه میشوند. از مزایای این الیاف میتوان به جرم مخصوص پایین، مدول کششی بالا، استحکام کششی بالا، مقاومت بالا در برابر ضربه اشاره نمود. از طرفی وجود خواصی همچون مقاومت فشاری پایین، مشکلات برشکاری و حساسیت به نور ماوراء بنفش و نورخورشید (کاهش قابل ملاحظهای در استحکام کششی و رنگپریدگی) باعث محدودیت استفاده از این الیاف میشود. انواع الیاف آرامید عبارتند از: ۱- الیاف بلند, الیاف بلند به صورتهای مختلف ا ز قبیل نخ, رشتهای, پارچهای در انواع بافت و وزن و به صورت ترکیبی با الیاف کربن و شیشه (که در این حالت میتوان محدودیتهای موجود در هر یک را تا حدی با الیاف دیگر پوشش داد) یافت میشود. الیاف کوتاه در اندازه های۱ mm ۲۵ mm جهت ترکیبات قالبگیری استفاده میشوند[۵].

۲-۳-۲-۳- الياف كربن

الیاف کربن شامل آلیاژی از کربن آمرف و کربن گرافیتی میباشند. اتمهای کربن در صفحات موازی از شش ضلعی منظم تشکیل شدهاند که این صفحات توسط نیروهای واندروالس به یکدیگر نگاه داشته شده و در هر صفحه بین اتمهای کربن پیوندهای بسیار قوی کووالانسی وجود دارد. مزایای این الیاف عبارتند از: استحکام کششی بالا، مدول کششی بالا، وزن مخصوص پایین، ضریب انبساط حرارتی پایین و استحکام خستگی بالا، از طرفی پایین بودن مقاومت در برابر ضربه (شکنندگی)، بالا بودن هدایت الکتریکی، کرنش پایین در زمان شکست و قیمت بسیار بالا، جزء محدودیتهای آنها میباشد. از قابلیتهای ویژه الیاف کربن باقیماندن خواص در محدوده دمایی ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد (در محیط خلاء و غیر اکسیدی) است، البته این خصوصیات برای استفاده در مواد مرکب با بستر پلیمری چندان مفید نیست ولی کاربردهای ویژه ای از جمله در نیروگاههای هستهای و کورههای سنتزکننده دارد. انواع الیاف بلند به صورتهای مختلف از قبیل نخ، رشتهای، پارچهای ساده بافت و غیره در انواع وزنها، نمدی و نواری وجود دارند. از طرفی الیاف کوتاه در اندازه mm ۱ الی mm ۲۵ جهت ترکیبات قالب گیری در پلاستیکها و در اندازه mm ۵ موجود

۲-۴- خصوصیات فیزیکی

۲-۴-۲- چگالی چگالی مصالح FRP در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که ۴ تا ۶ بار کمتر از چگالی فولاد میباشد (جدول(۲-۱)). این کاهش چگالی میتواند منجر به کاهش هزینه حملونقل, سهولت در جابجایی مصالح و همچنین کاهش بار مرده سازه تقویتشده گردد.[1]

	۲۸ و فولاد ۲۱۱ / Kg [۱]	ل(۱-۱) چکالی تر کیبات ۲.	جدو
فولاد	GFRP	CFRP	AFRP
٧٩٠٠	17・・ - 71・・	1018	1210

عدول(۲-۱) چگالی ترکیبات FRP و فولاد ³ Kg/ m

۲-۴-۲ اثرات دمای بالا

در دمای بیشتر از T_g، مدول الاستیسیته پلیمر با توجه به تغییرات ساختار مولکولی آن کاهش مییابد. دمای T_g, بستگی به نوع رزین دارد ولی معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۸۲ درجه سانتیگراد می باشد. در یک کامپوزیت FRP، الیاف که خصوصیات حرارتی بهتری نسبت به رزین دارند، می توانند مقداری از بار را در جهت طولی تا cral دمای نهایی تحمل خود انتقال دهند. این دما برای الیاف شیشه، آرامید و کربن به ترتیب ۱۰۰۰٬۱۷۵ و ۲۷۵ درجه سانتیگراد می باشد (۲

۲-۵- خصوصیات مکانیکی

۲–۵–۱– رفتار کششی

در بارگذاری کشش مستقیم، مصالح FRP قبل از گسیختگی هیچگونه رفتار خمیری ندارند. رفتار کششی مصالح FRP با یک نوع الیاف، توسط یک رابطه تنش-کرنش خطی الاستیک تا هنگام شکست که به طور ناگهانی اتفاق میافتد، مشخص میشود. مقاومت کششی و سختی مصالح FRP به عوامل متعددی بستگی دارد. از آنجا که در مصالح FRP الیاف نقش اصلی در باربری را دارند, نوع الیاف، جهت قرارگیری و همچنین مقدار آنها مهمترین نقش را در خواص کششی مصالح FRP ایفاء میکنند.

۲-۵-۲ رفتار فشاری

سیستمهای تقویت FRP که به صورت پوشش بیرونی عمل می کنند, نباید به عنوان تقویت کننده فشاری مورد استمهای تقویت کنیده فشاری مورد استفاده قرار گیرند. مقاومت فشاری سیستم FRP با الیاف شیشه، کربن و آرامید به ترتیب حدود ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد مقاومت کششی آنها می باشد.

FRP انتخاب نوع سيستم

۲-۶-۱ ملاحظات محيطي

شرایط محیطی به طور ویژهای بر رزینها و الیاف در انواع سیستم FRP تاثیر می گذارد. مشخصات مکانیکی (برای مثال، مقاومت کششی، کرنش و مدول الاستیسیته) بعضی از سیستمهایFRP به واسطه قرار گرفتن در معرض عوامل محیطی، مانند محیط قلیایی، آب نمک، مواد شیمیایی، اشعه فرابنفش، درجه حرارتهای بالا، رطوبت بالا و دورههای یخ زدن و آب شدن کاهش مییابد. بعضی از ملاحظات محیطی مهم که وابسته به طبیعت سیستمها هستند در زیر ذکر شدهاند.

محیط قلیایی یا اسیدی: عملکرد سیستم FRP در محیطهای قلیایی و اسیدی در بیشتر اوقات بستگی به رزین و الیاف تقویت کننده دارد. الیاف کربن خشک و غیر اشباع یا بدون محافظ، در برابر عوامل محیطی اسیدی و قلیایی مقاوم هستند. در حالی که الیاف شیشه در بیشتر اوقات نسبت به این عوامل حساس بوده و از نظر خواص کاهش پیدا میکنند. با این وجود یک رزین مناسب میتواند از تاثیر این عوامل روی الیاف، محافظت نماید.

انبساط حرارتی: سیستمهای FRP ممکن است خصوصیات انبساط حرارتی متفاوتی نسبت به بتن داشته باشند. ضمن آنکه، خصوصیات انبساط حرارتی الیاف و پلیمر تشکیل دهنده سیستم FRP میتوانند تغییر کنند. الیاف شیشه, ضریب انبساط حرارتی مشابه با بتن دارد. محاسبه تغییرات کرنش ناشی از حرارت، پیچیده بوده و به متغیرهایی مانند راستای الیاف، درصد حجمی الیاف(نسبت حجم الیاف به حجم کل) و ضخامت لایههای چسب وابسته میباشد.

رسانایی الکتریکی: الیاف شیشه و الیاف آرامید در عایقبندی الکتریکی مؤثر میباشند ولی الیاف کربن رسانا هستند. به همین دلیل برای جلوگیری از خوردگی الکتروشیمیایی فولاد، مصالح FRP با پایه کربن نباید با فولاد تماس مستقیم داشته باشند.

۲-۶-۲ ملاحظات بارگذاری

شرایط بارگذاری در سیستمهایFRP با الیاف مختلف تاثیر میگذارد. لازم است سیستم FRP بر پایه دانش مربوط به رفتار سیستم تحت شرایط مورد نظر انتخاب شود. بعضی از ملاحظات بارگذاریهای مهم که مربوط به رفتار سیستم است، به شرح زیر میباشند:

تحمل ضربه: سیستمهای با الیاف شیشه و آرامید تحمل بهتری در ضربه نسبت به سیستمهای با الیاف کربن از خود نشان میدهند.

گسیختگی ناشی از خزش و خستگی: سیستمهای با الیاف کربن مقاومت زیادی در برابر گسیختگی خزشی تحت بارهای مداوم و پیوسته و همچنین گسیختگی ناشی از خستگی تحت بارهای نوسانی از خود نشان میدهند. سیستمها با الیاف شیشه نسبت به هر دو شرایط بارگذاری، حساستر میباشند[۱].

قصل سوم

1-3- ييشىگفتار

در مراجع مختلف تعاريف گوناگوني از مقاومسازي انجام شده است كه به عنوان يك تعريف جامع و كامل ميتوان چنين بيان نمود: « اصلاح منطقي خصوصيات سازه اي يك ساختمان موجود براي بهبود عملكرد آن». ديوار هاي برشي، قابهاي خمشي، ديافراگمهاي افقي و اتصالات, بيش از همه مستعد خسارت هستند و هركدام به نحو مشخصي گسيخته ميشوند. اقدامات متداول براي تعمير و تقويت عبارتند از:

- 1- خارجسازي اعضاء خسارت ديده و جايگزيني آن توسط اعضاي جديد
 - 3- ضخيم نمودن و بزرگسازي اعضاء

3- اضافه نمودن ديوار هاي برشي، مهاربندي هاي قائم هم مركز و خارج از مركز وستون هاي جديد به سازه

4- تبديل اتصالات برشي به اتصالات مقاوم خمشي

5-كاهش جرم به وسيله حذف طبقات فوقاني و ...

تقسيمبندي درمقاومسازي سازهها ميتواند به شكل كمّيتري نيز بيان شود, بدين صورت كه مقاومسازي ممكن است به دو روش افزايش مقاومت و يا افزايش شكلپذيري انجام پذيرد. روش افزايش مقاومت غالباً وقتي مورد استفاده قرار ميگيرد كه مقاومت سازه كافي نبوده و بالا بردن شكلپذيري آن نيز به راحتي ميسر نباشد, كه ميتوان به روشهايي از قبيل اضافه نمودن ديوار بال⁴⁰ به ستونها و ديوارهاي برشي، اضافه نمودن مهاربندها و... اشاره نمود.

در مواردي كه مقاومت سازه ناكافي بوده و مقاومسازي آن از طريق مهاربندها و ديوارهاي برشي امكان پذير نباشد, اصلاح شكل پذيري ميتواند به عنوان يك گزينه مفيد و قابل بررسي مورد توجه قرار گيرد. به عنوان مثال با تقويت برشي در تيرها ميتوان شكست برشي را به گسيختگي خمشي تغيير داد، كه باعث افزايش شكل پذيري سازه ميشود.

به طور كلي مقاومسازي ساز هاي بتني موجود يا مرمت آنها با استفاده از مصالح مناسب و شيوههاي اجرايي صحيح به طور متعارف انجام ميگردد. استفاده از مواد مركب FRP به عنوان يك ضرورت در جايگزيني مصالح سنتي و شيوههاي موجود معرفي شده است.

همانطور كه در فصل قبل اشاره شد, مصالح FRP، سبك، مقاوم در برابر خوردگي و داراي مقاومت كششي بالا ميياشند. اين مصالح به شكلهاي مختلف و در گسترهاي از انواع ورقههاي چند لايه كارخانهاي گرفته تا ورقههاي خشك قابل پيچش روي اشكال مختلف سازهاي قابل دسترس ميياشند. از مواد FRP ميتوان براي تقويت انواع سازهها از جمله تيرها، ستونها، دالها و ديوارها استفاده كرد. موضوع تقويت بسته به نوع عضو تقويت شده ممكن است يكي از موارد زير باشد.

- 1- افزايش ظرفيت بار محوري، بار خمشي و بار برشي
 - 2- افزايش شكلپذيري براي بهبود علمكردهاي لرزهاي
- 3- افزايش سختي براي كاهش تغيير شكل سازه تحت بارهاي طراحي و سرويس.
 - **4**۔ افرایش عمر خستگي
 - 5۔ افزایش تداوم عملکرد در مقابل اثرات محیطی۔

در اين فصل با توجه به نتايج آزمايشها و تحقيقات انجام شده, مقاومسازي خمشي و برشي تيرهاي بتنآرمه تقويت شده با ورقه FRP مورد بررسي قرار ميگيرد.

2-3- مقاومسازي خمشى تيرهاي بتنآرمه با ورق FRP

روكشهاي پليمري FRP به منظور مقاومسازي و بهسازي خمشي سازههاي بتني اولين بار در سال **1980** توسط مير⁴⁴ در آزمايشگاه مركزي تست مصالح سوئيس مورد استفاده قرار گرفت. اتصال ورقههاي فولادي به ناحيه كششي اعضاء بتني جهت افزايش مقاومت خمشي به عنوان روشي مطرح و بادوام مرسوم ميياشد, اما به دليل خوردگي فولاد و همچنين ضعفهايي كه در روند اجرا دارد, نميتواند روش مناسبي در تأمين مقاومت مورد نظر سازه باشد. لذا امروزه بيشتر تحقيقات بر روي جايگزيني مواد FRP به جاي فولاد متمركز شده است. براي مقاومسازي خمشي، ورقهاي FRP به كمك چسب به سطح زيرين تير متصل

مي شوند **[6].**



شكل**3-1-** مقاوم سازي خمشي تير هاي بتن آرمه با ورقه FRP [6]

براي كاهش ريسك عدم پيوند ورق با تير, ميتوان از ورقههاي پيشساخته يا مهارهاي U شكل در انتهاي ورق استفاده كرد, كه استفاده از تسمه U شكل فولادي يا از جنس FRP معمولتر است. اين تسمهها ميتوانند با پيچ يا چسب به انتهاي تير متصل شوند.

ورقههاي FRP متصل شده به قسمت تحتاني تير را ميتوان به صورت تنيدهنشده⁴² يا پيشتنيده⁴³ به كار برد.



شکل FRP- تیر بتن آرمه مقاوم شده با ورقه FRP با مهار U شکل [7]

1-2-3 ورقەھاي زيرين تنيدەنشدە

اين روش نسبت به حالت پيشتنيده كاربرد وسيعتري دارد. لذا اكثر تحقيقات روي اين روش متمركز شده است. 3 روش جهت جسباندن ورقهها به كف تير بتن آرمه وجود دارد[1].

- ورقه هاي پيش ساخته FRP با فرايند پلتروژن⁴⁴

- ورقه هاي آماده شده در محل (دست ساز)⁴⁵

۔ روش تزریق چسب

در روش اول ابتدا ورقهها با استفاده از قالبهايي متناسب با شكل مقطع, ساختهشده و سپس به سطح زيرين تير بتنآرمه چسبانده ميشوند، اين روش داراي درجه اطمينان بالايي از نظر يكنواختي مواد و كنترل كيفيت ميباشد. روش دستي داراي كاربرد بيشتري است, در اين روش ابتدا رزين را به سطح بتن كشيده، سپس لايه فيبري را به وسيله غلتك به سطح بتن ميچسبانند. اين

۲-Unstressed Soffit Plates

[°]-Prestressed Soffit Plates

 $\ -Pultrusion$

فرایند پلتروژن: با این روش لمینیت ها یا ورقهای پوشـشـی با مقطع عرضـی و طول معین ساخته می شود در این روش حین کشیدن نوار فیبر رزین یا ماتریس که معمولاً از پلی اسـتر یا وینیل اسـتر می باشـد با گرمای الکتریکی به کمک روغن داغ به فیبر اضـافه می شـود و اتاقک پیش گرمایشـی فرکانس رادیویی کنترل کننده ضخامت در زمان عمل آوری می باشد.

روش به ناصافي سطح بتن حساس بوده واين ناصافي ها سبب عدم پيوند مناسب FRP و جدايي ورق از بتن ميگردد. روش تزريق چسب نيز خصوصياتي مشابه با روش دستساز دارد, ولي كاربرد آن محدود است[7].

2-2-3- ورقهاي پيشتنيده زيرين

ورق هاي FRP با فرايند پلتروژن را ميتوان به صورت پيشتنيده به تير بتن آرمه متصل كرد. مهمترين مزيت استفاده از ورق هاي پيشتنيده افزايش ظرفيت باربري سازه قبل از وارد شدن بار به آن است, كه سبب كاهش عرض ترك ها مي شود. و از آن جاييكه مقاومت كششي FRP بالا است, پيشتنيدگي منجر به كاربرد مؤثر تر آن مي گردد. پيشتنيدگي نسبت به پار امتر كار گر حساس بوده و نياز مند دقت بخصوصي جهت طراحي و نصب سيستم مهاريي انتهايي است [7].

3-3- مدهاي گسيختگي در تيرهاي بتنآرمه تقويت شده با تركيبات FRP در خمش

FRP عسيختكي ناشي از پاركي ورقه

از آنجاييكه شكست ناشي از پاره شدن پليمر هاي اليافي, پس از تسليم آرماتور هاي طولي رخ ميدهد, اين نوع شكست نرم و مطلوب بوده و از حداكثر ظرفيت خمشي تير استفاده مي شود [7].

شكل**3-3-** پارگي ورقه FRP [7]





Mid-span

2-3-3 كسيختكي ناشي از خردشدكي بتن ناحيه فشاري

اين مد به دليل خرد شدن بنن ناحيه فشاري بسيار ترد است. توجه شود كه گاهي بر اثر تقويت خمشي, تير دچار گسيختگي ترد برشي ميشود كه بايستي با تقويت تو أم برشي و خمشي از ايجاد اين مد ناگهاني جلوگيري نمود[7].



شكل**3-5-** خردشدگي بتن فشاري [**7**]

3-3-3 كسيختكي ناشي از عدم پيوند جداشدكي) انتهاي ورق

اين نوع گسيختگي زودرس بوده و مانع رسيدن تير به ظرفيت خمشي نهايي خود ميشود. در اين نوع گسيختگي, ورق در انتهاي تير از سطح بتن جدا ميشود. كه ميتواند با مد گسيختگي ناشي از جدا شدگي پوشش بتن تركيب شود**[7].**



شكل**6-3-** جدايش ورقه FRP در انتهاي ورقه[8]

3-3-4- جدا شدگي پوشش بتن در سطوح كششي يا برشي

اين گسيختگي بر اثر بهوجود آمدن ترك در محل يا نزديكي انتهاي ورق به علت بالا بودن تنشهاي برشي ونرمال و همچنين قطع ناگهاني ورق در اين محل رخ ميدهد. اين تركها در سطح كششي به صورت افقي و در راستاي فولادهاي كششي انتشار مييابند و سبب جداشدن پوشش بتني ميگردند[7].



شكل**7-3-** جدا شدكي پوشش بتن [7]

3-3-3- عدم پيوند سطح مشترك انتهاي ورق

عدم پيوند مناسب بين چسب وتير , كه از انتهاي ورق توسعه مييابد, دليل ايجادچنين مد گسيختگي

است. پاسخ بار -تغيير مكان اين مد مانند مد گسيختگي ناشي از جدايش پوشش بنني است. تحقيقات نشان ميدهد اين نوع گسيختگي به دليل بالا بودن تنش برشي و نرمال انتهاي ورق يا در نزديكي آن ايجاد ميشود. با ظهور اين نوع گسيختگي, سيستم FRP از سطح بتن, با يك لايه نازك از بتن چسبيده به آن جدا ميشود. خطر از بين رفتن پيوند سطح مشترك, ميتواند در اثر نامر غوب بودن چسب و ناهمواري سطح بتن تشديد شود [7].



شكل8-8- عدم پيوند درون وجهي انتهاي ورق [7]

3-3-6- كسيختكي ناشي از ترك هاي وسطر به انضمام عدم پيوند سطح مشترك

گسيختگي پيوندي, ممكن است در اثر ترك خمشي يا تركيب ترك خمشي- برشي در فاصلهاي دورتر از انتهاي ورق شروع شده و به سمت انتهاي نزديكتر توسعه يابد. اين نوع گسيختگي غالباً در بتن مجاور چسب رخ ميدهد و ميتواند به دو شكل گسيختگي ناشي از ترك خمشي مياني به انضمام عدم پيوند سطح مشترك و يا گسيختگي ناشي از ترك خمشي- برشي مياني به همراه جدا شدن سطح مشترك رخ دهد. اين نوع گسيختگي در تير هاي سطحي و غير عميق بيشتر از گسيختگي انتهايي ورق رايج است [7].



شكل3-9- كسيختكي ناشي از تركهاي وسطبه همراه جدا شدن سطح مشترك[7]

3-3-6-1- كسيختكي ناشي از ترك خمشي مياني به همراه ازبين رفتن چسبندكي سطح مشترك

به دنبال ايجاد ترك خمشي اصلي در بتن, تنشهاي كششي حمل شده توسط آن به ورق FRP منتقل مي شود. به عبارت ديگر تنش كششي سطح مشترك بين بتن و ورق FRP, در نزديكي محل ترك به طور ناگهاني افزايش مييابد. با رسيدن اين تنشها به مقدار بحراني، عدم پيوند وچسبندگي در محل ترك آغاز شده و به سمت انتهاي نزديك گسترش مييابد [7].



شكلFRP - كسيختكي عدم بيوند ايجاد شده در ورقه FRP در اثرترك هاي خمشي [8]

3-3-3-2 كسيختكي ناشي از ترك خمشي برشي مياني به همراه جدا شدن سطح مشترك

عريض شدن ترك, يك نيروي محرك براي افزايش عدم پيوند وچسبندگي است. كه در اين حالت، فاصله عمودي بين دوسطح ترك, توليد تنش غشايي روي ورق FRP نموده كه به لايه دروني بتن نيز گسترش مييابد. از نظر محققان عريض شدن ترك در اين مد گسيختگي, مهمتر از اثر جابجايي دو سطح ترك بر روي يكديگر است[7].

4-3- مقاوم سازي برشي تيرها

شكست خشي و برشي دو مد شكست اصلي در تيرهاي بتنآرمه هستند, كه شكست خمشي به علت شكليذير بودن به عنوان مد شكست حاكم، به شكست برشي ترجيح داده مي شود. شكست نرم (شكل پذير) اجازه باز توزيع تنش را داده و با بروز علائم هشدار دهنده اين امكان را مي دهد كه قبل از فروريختگي, اقدامات لازم به عمل آيد. حال آنكه شكست برشي نزد بوده و ممكن است, سريع و بدون هيچ زنگ خطري رخ دهد. بنابر اين انتخاب روشي مناسب براي تعمير و مقاومسازي ساز ههاي دچار نقص برشي بسيار حانز اهميت است. نقص برشي مي تواند تحت هر يك از عوامل افز ايش در وزن بار مجاز، زوال ناشي از فرسودگي، قرار گرفتن در معرض عوامل محيطي، نارسايي يا كمبود تقويتهاي برشي، خور دگي تقويتهاي برشي و ... رخ دهد. به طور نمونه را محلهايي كه براي اين نوع نارسايي وجود دارد مي تواند شمال محدود كردن بار هاي وارده، جايگزيني همه و يا قسمتي از اعضاي سازه و مقاومسازي اعضا اصلي باشد. محدود كردن بار ها يك روش موقتي بوده و نمي تواند به صورت زيربنايي به حل اين مشكل بپردازد. جايگزيني اعضا سازه نيز بسيار مشكل و پر هزينه است و گاهي به دليل اهميت تاريخي – فرهنگي و ارزشهاي معماري برخي بناها چنين كاري مقبول نيست و فقط زماني كه سازه به سطحي از زوال مي سد كه يمر ان غير ارزشهاي معماري برخي بناها چنين كاري مقبول نيست و فقط زماني كه سازه به سطحي از زوال مي سد كه تعمير آن ممكن است, استفاده از آن اجتنابخاپذير مي باشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتنابخاپذير مي باشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتنابخاپذير مي باشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي ممكن است, استفاده از آن اجتنابخاپذير مي باشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي مختلف از قبيل استفاده از آن اجتنابخاپذير مي باشد. معمولاً روش مناسب براي رفع نقص برشي استفاده از تكنيكهاي مقاومسازي موام مازي بر شي تير هاي بي تي زمه و بن اي دري موش براي بهبود كار آيي سازه هي بني تي تويد است. اما مشكلات مربوط به آمادمسازي، حمل و نقل و نصب آنها و همچنين امكان خوردگي اين صفحات نياز به استفاده از مواد ما مر او اي ش

نتايج آزمايشگاهي و مدلهاي تحليلي ثابت كردهاند كه استفاده از تركيبات مختلف FRP ميتواند ظرفيت برشي تيرها را به طور قابل ملاحظهاي افزايش دهد. به منظور افزايش ظرفيت برشي تير, ميتوان صفحات FRP را در الگوهاي مختلف دورپيچ كامل، نصب در دو سطح جانبي تير و يا به صورت پوشش U شكل به جان تير متصل نمود. براي اين منظور ميتوان از الگوي يكپارچه ورق يا Laminate و نوارهاي منقطع يا strips استفاده كرد**[10].** براي درك بهتر نحوه مقاومسازي برشي نيرهاي بتنآرمه، پديده تركخوردكي، مدهاي كسيختكي و نقش آرماتورهاي برشي، مطالعه رفتار تيرهاي بتني تحت برش و تعيين عوامل موثر در رفتار و ظرفيت برشي ضروري است, كه در ادامه به آن پرداخته ميشود.

5-3- بررسي رفتار برشي تيرهاي بتني

1-5-3- تركهاي برشي و عوامل مؤثر در رفتار اعضاء بتنآرمه تحت برش

تنشهاي كششي در تيرها تنها محدود به تنشهاي خمشي نيستند. بلكه اين تنشها با شدتها و زواياي تمايل مختلف در تمام نقاط تير وجود دارند. اين تنشهاي كششي را اصطلاحاً تنشهاي كششي قطري يا تنشهاي كششي مايل ميگويند. با افزايش بار، تنشهاي برشي و در نتيجه تنشهاي كششي قطري افزايش مييابند. در اين شرايط مقطع در امتداد صفحهاي كه تنش كششي مربوط به آن به مقاومت كششي بتن رسيده است ترك ميخورد. چنين تركهايي را اصطلاحاً تركهاي قطري يا مايل ميناد، تركهاي قطري به دو صورت ممكن است به وجود آيند[11]:

- ترك برش در جان كه تركهاي كشش قطري تحت زاويه **45** درجه در محل صفحة خنثي هستند و هنگامي رخ ميدهند كه تنشهاي خمشي ناچيز باشند.



شکل-111- ترک برش در جان[11]

- تركهاي خمشي – برشي كه هرگاه در يك ناحيه از تير هر دو مقدار لنگر خمشي و نيروي برشي زياد باشد, اين مكانيزم ترك به وجود ميآيد. در اين مواقع ابتدا تركهاي خمشي در نواحي تحت كشش ايجاد شده سپس در جهت افقي متمايل شده و توسعه مييابد[11].



شكل12-31- ترك خمش- برش [11]

پس از ترك خوردن، انتقال برش در عضو بتني توسط تركيبي از مكانيزمهاي زير صورت ميگيرد[11].

- V_{cz} مقاومت برشي بتن ترك نخورده **1**-
- V_a نيروي ناشي از درگير بودن دانههاي سنگي ${\bf 3}$
 - V_d عمل برش آرماتور هاي طولي3

 V_{s} مقاومت برشي تامين شده توسط آرماتور هاي برشي 4



شكل-13-3 مكانيزم انتقال برش پس از ايجاد ترك برشي [11]

نتايج آزمايش ها نشان دادهاند كه نسبت دهانه برشي, a, به عمق مؤثر, d, تأثير اساسي بر مقاومت برشي مقطع ترك خورده دارد و عامل غالب مؤثر بر رفتار برشي است.

مككرگور⁴⁶ تيرها را به 4 نوع بر اساس نسبت
$$\frac{a}{d}$$
 تقسيم كرد[12]:
1-تيرهاي عميق با نسبت $\frac{a}{d}$ كوچكتر از يك.
2/5 تيرهاي عميق با نسبت $\frac{a}{d}$ بين 1 تا 2/5.
3-تيرهاي كوتاه با نسبت $\frac{a}{d}$ بين 2/5 تا 6.
3-تيرهاي معمولي با نسبت $\frac{a}{d}$ بين 3/5 تا 6.

تيرهاي عميق**1>** $\frac{a}{d}$: در اين حالت پس از ايجاد ترك قطري، تير مانند يك قوس مهار شده عمل ميكند(شكل(**5-3)),** كه در آن بار وارده به وسيله فشار مستقيم در سراسر ناحيه هاشورخورده و كشش در آرماتور طولي, انتقال مييابد و بدين ترتيب با بازتوزيع نيروهاي برشي در مقطع, قطعه همچنان به مقاومت در مقابل برش ادامه ميدهد.

N-Macgregor 1988



شكل**3-14-** عمل قوسي [11]

گسيختگي در چنين تيرهايي به صور مختلف رخ ميدهد كه عبارتند از **[11]:**

لغزش(يا زوال چسبندگي) آرماتور كششي در بتن، خرد شدن عضو در محل تكيهگاه, گسيختگي خمشي ناشي از خرد شدن بتن بالاي قوس يا تسليم شدن آرماتور كششي و گسيختگي بدنه قوس در اثر خروج از مركزيت نيروي فشاري در قوس كه در اثر آن يا ترك كششي در تكيهگاه ايجاد ميشود و يا بتن در قسمت تحتاني بدنه قوس خرد ميشود.



شكل 15-34- حالات مختلف گسيختگي در تير هاي عميق [11]

تير هاي كوتاه 2/5 > $\frac{a}{d}$ >1: پس از ايجاد ترك خمشي – برشي، با افزايش بيشتر بار, ترك به ناحية فشاري نفوذ ميكند و به صورت يك ترك ثانويه به سمت آرماتور كششي انتشار مييابد و در امتداد آن پيش ميرود. سر انجام گسيختگي به يكي از دو صورت زير رخ ميدهد[11]:

- لغزش آرماتور كششي در بتن گسيختگي برشي-كششي)

- خرد شدن بتن نزديك وجه فشاري كسيختكي برشي- فشاري)



شكل-16-3- حالات مختلف گسيختگي در تير هاي كوتاه[11]

تير هاي معمولي با دهانه متوسط **6** < **2/5:** در اين تير ها ابتدا تركهاي خمشي قائم ايجاد ميشوند و به دنبال آن تركهاي خمشي – برشي به وجود ميآيند.



شكل17-3- كسيختكي ناشي از كشش قطري در تير هاي با دهانه متوسط[11]

تير هاي بلند **6 > ^a**: در اين تير ها اصولاً گسيختگي تنها ناشي از خمش است و به ندرت ترك هاي خمشي – برشي به d - *d* وجود ميآيند.

بار محوري نيز ميټواند تاثير قابل توجهي بر مقاومت برشي اعضاء بتنآرمه داشته باشد. اين بارها ممکن است در اثر بارهاي خارجي، افت و حرارت و يا نيروهاي پيشتنيدگي به وجود آيند.

نيروي فشاري، تنشهاي كششي را كاهش ميدهد و در نتيجه تمايل به ايجاد ترك قطري كاهش مييابد و بر عكس وجود نيروي كششي سبب افزايش تنشهاي كششي و تمايل بيشتر به ترك خوردن ميشود[11].

2-5-3- نقش آرماتور برشي در رفتار تيرها

اساس فلسفة آيين نامه ACI در مسلح كردن اعضا بتني براي برش، جلوگيري از رشد تركهاي مايل و افزايش شكلپذيري سازه ميباشد. بنابراين در مواردي كه پيشبيني ميشود ترك قطري در مقطع به وجود ميآيد و براي جلوگيري از شكست ترد و اتفاقي بايد اقدام به مسلح كردن مقطع با خاموت نمود. به خصوص در مواردي كه عضو در معرض نيروهاي برش غير منتظره ناشي از نشست، زلزله و ... باشد[11].

6-3- روش هاي سنتي مقاومسازي برشي

روشهاي متداول تقويت براي بالا بردن ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه عبارتند از [13].

1-نصب ورق هاي فو لادي

3-استفاده از خاموت هاي خارجي و

1-6-3- اتصال ورق هاي فولادي

اتصال ورقهاي فولادي به جان تير با استفاده از مهار مناسب يكي از معمولترين روشهاي مورد استفاده براي تقويت برشي تيرهاي بتنآرمه است. هر چند اين روش ظرفيت برشي تير را افزايش ميدهد اما داراي معايبي است كه عبارتند از **[13]:**

1- كنترل بار هنگام نصب ورقهها (مانند كنترل ترافيك در تقويت تير پلها)
3- افزايش وزن مرده سازه
3- نياز به تجهيزات دقيق براي قرار دادن ورق ها در محل
4- نياز به مهار مناسب انتهاي صفحات
5- دشواري تغيير شكل ورق هاي فو لادي در مقاطع پيچيده
6- بالا رفتن هزينه نگهداري به خاطر خوردگي ورق هاي فو لادي و
ميتوان براي حل مشكل مهاربندي، از چسب براي اتصال ورق هاي فو لادي استفاده نمود.

2-6-3 استفاده از خاموت هاي خارجي

براي كمكردن نارسايي برشي در تيرهاي بتنآرمه ميتوان از خاموتهاي فلزي خارجي استفاده نمود. اين خاموتها ميتوانند بدون پوشش در سطح بتن استفاده شوند, كه به علت قرار گرفتن در معرض عوامل بيروني ممكن است بهسر عت خورده شوند, به خصوص در پلها به دليل استفاده از نمكهاي ضديخ براي ذوب كردن برف و يخ، خوردگي تسريع ميشود. براي محافظت اين خاموتها ميتوان از پوشش بتن استفاده نمود, كه در اين صورت بار مرده اضافه عمدهاي به سازه تحميل ميشود[13].

بايستي يادآور شد كه روشهاي ذكر شده در بالا تنها رامحلهاي موجود نبوده و فقط نمونهاي از روشهايي هستند كه با هزينههاي مناسب و تكنيك نسبتاً ساده, قابل اجرا ميباشند.

7-3- استفاده از صفحات FRP براي مقاومسازي برشي

گرايش روزافزون به استفاده از سيستمهاي FRP براي مقاومسازي برشي دلايل گوناگوني دارد. مواد FRP مقاومت زيادي در برابر محيطهاي خورنده دارند، به سهولت و بدون نياز به تجهيزات بر روي تير نصب ميشوند اين سيستمها همچنين ميتوانند, در سطوحي با دسترسيهاي محدود يا جاهايي كه اجراي شيوههاي متعارف با مشكلاتي مواجه هستند, مورد استفاده قرار بگيرند. با اشاره به اينكه عمر خدمت آنها ميتواند مشابه تقويتهاي داخلي باشد[**14**].

8-3- پارامترهاي مؤثر در تقويت برشي تيرها با ورقه FRP

مقاومت برشي اضافي تأمينشده توسط FRP به عوامل زيادي بستگي دارد, كه ميتوان آنها را به دو گروه خصوصيات مربوط به FRP و چسب و خصوصيات عضو بتني تقسيمبندي نمود.

1-8-3 و چسب FRP و چسب

- شكل و الكوي تقويت
 - _ مقدار و نوع FRP
- جهت قرار گيري الياف با محور عضو
 - _ تعداد لايههاي ورقه FRP
 - ـ تنش و كرنش نهايي FRP
 - ـ تنش برشي چسب
 - _ طول چسبندگي ورقه FRP

_ ضخامت ورقه FRP

2-8-3- خصوصيات عضو بتني:

۳-۹- مرور و تلفیق پارامترهای مطالعه شده

همانطور كه در مبحث قبل بيان شد, پارامتر هاي متعددي بر رفتار اعضاء بتن آرمه مقاوم شده با ورقهايFRP موثر هستند كه پيچيدگي موضوع و ماهيت تحقيقي مطالعات آزمايشي را نشان ميدهند. در جدول 1 خلاصه جزئيات آزمايشهاي انجام شده در ارتباط با موضوع آورده شده است. از جدول مطالب زير را ميتوان استنباط نمود.

1- بيشتر پارامتر هاي مطالعه شده در ارتباط با خواص FRP هستند و مطالعه پارامتر هاي ديگر موثر در مكانيزم مقاومت برشي نظير اثر تقويتهاي برشي فولادي محدود مي باشند.

2- پر اکندگي پار امتر هاي مطالعه شده بسيار زياد است که باعث سخت ر شدن تفسير نتايج مي شود

				خواص و پارامتر ها																				
			هندسه				تير	يع	نو	بتن و فولاد			نوعFR P			الگوي مقاومسازي								
محقق	سال	تعداد أزمايش	libius ebës	، اکر شح مالقم	المائم mC-1	7m/1211	د ه أنه تب مم 1 < 1	in Ala 13 C-M/-1	تنام مالم الق	ائد مقداس ،	تند تدافر خدردم	بنتابة ساقم	Lab clar & La	ما کر دھام میں میں	S	آ، امیر	4 . î. î. î.	مين الارمين م	ر الالكار ال	<u> </u>	13.00 1	i 1 ai	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
Berset	1992	2																						
Uji	1992	4																						
Al-Sulimani	1994	2																						
Chajes	1995	4																						
Sato	1996	4																						
Miyauchi	1996	3																						
Taerwe	1997	4																						
Sato	1997	2																						
Umezu	1997	15																						

جدول **1-3-** خلاصه تحقيقات انجام شده روي مقاومسازي برشي با FRP [**21**]

Funakawa	1997	3												
Araki	1997	8							_					
Ono	1997	5												
Taljesten	1997	3												
Chaallal	1998	4												
Mitsui	1998	6												
Triantafillou	1998	9												
Khalifa	1999	2												
Khalifa	2000	4												
Kachlakev	2000	1												
Deniaud	2001	9												
Li	2001	4												
Khalifa	2002	4												
Pellegrino	2002	9												
Chaallal	2002	20												

10-3- بررسي پارمترهاي مختلف در تقويت برشي تيرهاي بتنآرمه با ورقه FRP

1-10-3- شكل و الكوي تقويت

به منظور افزايش ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه با تركيبات FRP، صفحات FRP بايد به وجوه جانبي تير متصل شوند. تعيين الگوي تقويت, شامل تعيين شكل ورقه اي يا نواري) ساختار و موقعيت و جهت FRP ميباشد. در شكل زير نمونههاي پيچيدن FRP براي افزايش مقاومت برشي تير نشان داده شده است كه عبارتند از: پيچيدن كامل سيستم FRP به دور مقطع، نصب FRP بر روي سه وجه تير به صورت پوشش U شكل و نصب FRP روي دو وجه جانبي تير [13].



شكل18-3 براي المونه هاي مختلف پيچيدن FRP براي افزايش مقاومت برشي تير [15]

اگر چه هر سه تكنيك ذكر شده در بهبود مقاومت برشي تير هاي بتن آرمه مؤثر ند, اما استفاده از الگوي a پوشش دور تا دور) موفق تري**ن** الگوي تقويتي در اين زمينه مي باشد. ولي به دليل عدم دسترسي كامل به تمام وجوه تير امكان اجراي آن بسيار كم است. استفاده از پوشش هاي U شكل روشي عملي براي افز ايش مقاومت برشي مقاطع بتن آرمه مي باشد, ولي عمدتاً در نواحي بالنگر مثبت مؤثر است. چرا که در نواحی بالنگر منفی معمولاً تركهاي اوليه در نزديکي دال بتني رخ داده و اين الگوي تقويتي قادر به كنترل و جلوگيري از گسترش تركهاي اوليه نيست.

در همه نمونهها FRP مىتواند به صورت ممتد در امتداد طول دهانه عضو يا به صورت نوارهاي مجزا قرار بگيرد. استفاده از نوارهاي مجزا امكان تبخير بهتر آب و عمل آوري بتن و همچنين مصرف كمتر FRP را فراهم ميسازد ولي از لحاظ اجرایی بسیار پرزحمت است, از طرفی امکان مد گسیختگی پیوندی و عدم چسبندگی در این حالت بیشتر میباشد. مزیت استفاده از الگوي يکپارچه علاوه بر سهولت کاربرد آن در محل, تأثير آن در محافظت نير در برابر عوامل جوي است[15].



شكل-19- الكوي يكپارچه و منقطع [13]

نوارها و ورقههاي FRP ميتوانند در زواياي مختلف, به خصوص **45** درجه براي کنترل تركهاي برشـي و در تعداد و لايههاي مختلف به طور نمونه در دو لايه عمود بر هم با زاويههاي متفاوت, نظير **0-90** درجه يا **45** ± درجه به كار برده شوند[13].



ب**۔ °90**

شكل**20-3- ج**هت فيبر هاي FRP [**15**]



شكل**3-21-** جهت فيبر هاي چندگانه FRP [**15**]

الف

به طور كلي ميتوان از نوار هاي تقويت در جهات مختلف و يا در حالت يكپارچه از جهت الياف اصلي متغير استفاده نمود.



شكل22-3- الكوهاي مختلف تقويت برشي تير با ورقهFRP [16]



2-10-3- مقدار ونوع FRP

استفاده از ورق هاي با الياف كربن (CFRP) و ورق هاي با الياف شيشه (GFRP) تأثير متفاوتي در تقويت برشي اعضاي بتن آرمه ميگذارند. ورقه GFRP به دليل داشتن مدول الاستيسيته پايين (اندكي بيشتر ازبتن) و تغيير شكل زياد، شكل پذيري عضو را افزايش داده و تأثير اندكي در افزايش مقاومت برشي دارد. در حالي كه ورق هاي CFRP به دليل داشتن مدول الاستيسيته بالا (بيشتر از فولاد) و تغيير شكل نهايي كم داراي رفتار ترد با شكل پذيري كم و مقاومت برشي تقويتي بالا است (شكل (3-20))



شكل CFRP مقايسه رفتار CFRP و GFRF [15]

3-10-3 جهت الياف با محور عضو

به دليل مقاومت زياد صفحات و نوارهاي FRP در جهت الياف, بايد راستاي قرار گرفتن الياف به صورتي باشد كه حداكثر بهرموري از مصالح, در جهت كنترل عرض تركخوردگي برشي وجود داشته باشد. همچنين جهت نيروهاي برشي در يك تير ممكن است به دليل وقوع زلزله يا ساير بارهاي رفت و برگشتي معكوس شود, بنابراين گاهي لازم است كه الياف در دو جهت متفاوت كه متناسب با ترك*ه اي برشي ز اشي از بارگ ذار چسد يك لي باشد, است فا د مشود. ال جته استفاد ه ازال ياف بدين صورت حتي د رشراي طي كه بروه اي برشي معكوس هم وار د نشون د, مغيد است [18].*

همانطور كه قبلاً نيز بدان اشاره شد, عموم تركهاي برشي تحت زاويه **45** درجه ايجاد ميشوند. لذا استفاده از الياف در جهت عمود بر زاويه تركخوردگي **(45** درجه**)** باعث افزايش تأثير تقويت برشي ميشود.

4-10-3- تعداد لايه هاي FRP

به طوركلي ميتوان گفت, با افزايش تعداد لايه ها تقويت بيشتري صورت ميگيرد. ولي با افزودن هر لايه تأثير لايه جديد در افزايش مقاومت برشي كاهش مييابد[**19].**

در مدل اجزاي محدود از آنجاييكه پيوند بين بتن و ورقه FRP, همچنين پيوند بين لايههاي مختلف, كامل درنظر گرفته ميشود و فرض بر اين است كه چسب اپوكسي پيوندي قويتر از پيوند بتن و ورقه FRP دارد, لذا تأثير تعداد لايهها را ميتوان در ضخامت لايه FRP بررسي نمود.

FRP- تنش برشى چسب و طول چسبندگى ورقه

چسبها براي اتصال لايههاي پيشعمل آوري شده FRP به سطح بتن به كار برده مي شوند. اين مواد مسيري براي انتقال بار بين سطح بتن زيرين و لايه مسلح FRP ايجاد ميكنند. لذا بايد خواص زير در توليد آن مورد توجه قرار بگيرند, تا نقش مؤثرتري در مقاومسازي و مرمت اعضاي سازهاي داشته باشند[**19].**

ميشود. افزايش طول چسبندگي نيز باعث جلوگيري از گسيختگي هاي موضعي ناپيوندي و در نتيجه رسيدن به ظرفيت مورد نياز تقويت FRP در مقاومسازي برشي تير ميگردد. اما افزايش بيشتر طول چسبندگي تا زماني مؤثر است که بيشتر از طول مؤثر گيرايي آن نشود[**19].**

همان طور كه گفته شد به دليل مقاومت بالاي چسبندگي چسب از تأثير آن در اكثر تحقيقات با مدل اجزاي محدود صـرف نظر شده و اثر چسب و طول چسبندگي صـرفاً در روابط تئوري ارائه شده براي مسأله گسيختگي ناپيوندي بررسي ميشود. كه در اين روابط براي سادگي، رفتار چسب خطي فرض شده است.

6-10-3- ضخامت ورقه FRP

به طور كلي مدهاي گسيختگي تير بتنآرمه تقويت شده با ورقه FRP با توجه به اثر ضخامت ورق را ميتوان به صورت زير طبقهندي نمود[**20].**

1- تسليم آرماتور كششي و به دنبال آن پارگي ورق FRP (گسيختگي FRP)
 3- تسليم آرماتور كششي و به دنبال آن خرد شدن بتن ناحيه فشاري شكست كششي)
 3- خردشدگي بتن قبل از تسليم آرماتور كششي شكست فشاري)

دو مد گسيختگي اول و دوم نرم بوده و با اخطار قبلي همراه هستند, اما مد گسيختگي سوم ترد و ناگهاني است. بنابراين ضخامت ورق FRP بايد به گونهاي انتخاب شود كه گسيختگي از نوع گسيختگي FRP و يا شكست كششي باشد. در گسيختگي از نوع اول نيز به اين دليل كه FRP قبل از رسيدن به مقاومت نهايي خودگسيخته ميشود, لذا گسيختگي مطلوب را از نوع گسيختگي دوم در نظر ميگيرند.

با توجه به شـكل **(26-3)** اگر ضـخامت ورقه يا لايه FRP از $t_{f,\min}$ كمتر باشد ناحيه **1)** ، مد گسيختگي از نوع گسيختگي FRP. و اگر ضخامت بين $t_{f,\min}$ و $t_{f,\min}$ باشد ناحيه **2)** ، مد گسيختگي از نوع شكست برشي است. اما اگر ضخامت ورقه يا لايه FRP از $t_{f,\max}$ بيشتر باشد ناحيه **3)**، گسيختگي ترد و ناگهاني روي ميدهد. بنابراين براي جلوگيري از شكست ترد خردشدگي بتن قبل از تسليم آرماتور كششي بايد مقدار $t_{f,ty}$ كمتر از $t_{f,max} = 0.75t_{f,ty}$ در نظر گرفته شود.



Thickness of web-bonded FRP, t_f

شكل**3-25-** رابطه بين ضخامت ورقه FRP و مد گسيختگي[17]

(t_{f.min}) د مینه (-10-3 مینه (

جهت تعيين ضخامت t_{f,min} فرضيات زير نظر گرفته ميشود[**20]:**

سازگاري کرنش فولاد, بتن و کامپوزيت.

باقي ماندن صفحات به صورت صفحه در خمش (اصل برنولي).

صرف نظر كردن از مقاومت كششي بتن, مقاومت چسب و مقاومت فشاري FRP براي سادگي مسأله.





با استفادهاز تشابه مثلثها ميتوان نوشت:

$$c = \frac{\mathcal{E}_{cu}}{\mathcal{E}_{cu} + \mathcal{E}_{fr}} h \tag{1-r}$$

که در آن**:**

و c فاصله تارنهايي بتن تا محور خنثي مي جه جه جه و جه جه و جه جه و جه جه و جن ما مع تير جن بين تا محور خنثي مي باشد.

$$c = \eta_3 h \tag{Y-T}$$

$$\eta_3 = \frac{\mathcal{E}_{cu}}{\mathcal{E}_{cu} + \mathcal{E}_{fr} + \mathcal{E}_{f_0}} \tag{(r-r)}$$

با تعيين ₆ كرنش اوليه كششي بتن در تار انتهايي تير تحت اثر بار هاي بهره برداري قبل از تقويت Saadatmanesh) (Malek,1998) مي توان ₆ را با استفاده از رابطه زير تعيين نمود[**20**].

$$\mathcal{E}_{c_0} = \frac{M_{\circ} c_{\circ}}{E_c I_{cr_0}} \qquad \qquad (^{\mathfrak{p}} \cdot \mathbf{r}) \qquad \Rightarrow \qquad \mathcal{E}_{f_0} = \mathcal{E}_{c_0} \left(\frac{h - c_{\circ}}{c_{\circ}} \right) \qquad (^{\mathfrak{d}} \cdot \mathbf{r})$$

رتفاع تا تار خنثي, E_c , مدول الاستيسيته بتن و I_{cr_0} , ممان اينرسي مقطع ترك خورده بتني ميباشد [20] . c_{\circ}

تنش درون ورقه FRP :

$$f_f = E_f(\varepsilon_f - \varepsilon_{f_\circ})$$
 (۶-۳)
کرنش در آرماتور فشاري :

$$\varepsilon'_{s} = \varepsilon_{cu} \left(1 - \left(\frac{d'}{\eta_{3} h} \right) \right) \le \varepsilon_{y} \tag{V-T}$$

با نوشتن معادله تعادل براي مقطع تير داريم :

$$0.85f_c'\beta_1 bc + A_s'\varepsilon_s'E_s - A_sf_y = f_{fr}t_{f,\min}(h-c)$$
(A-7)

$$\Rightarrow t_{f,\min} = \frac{0.85 f_c' \beta_1 \eta_3 bh + A_s' \varepsilon_s' E_s - A_s f_y}{f_{fr} h(1 - \eta_3)}$$
(9-7)

بار امتر تبديل بلوک تنش به صورت يکنواخت و مستطيلي بلوک تنش ويتني مي باشد . eta_1

(t_{f,ty}) بدست آوردن ضخامت در زمان تسليم آرماتور كششي (t_{f,ty})





با نوشتن روابط تعادل داريم[20]:

$$\eta_1 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}} \tag{1.-7}$$

1۔ اگر آرماتور فشاري تسليم شود:

$$t_{f,ty} = \frac{0.85 f_c' b d\beta_1 \eta_1 + A_s' f_y - A_s f_y}{E_f (\varepsilon_{cu} \frac{h - \eta_1 d}{\eta_1 d} - \varepsilon_{f_o})(h - \eta_1 d)}$$
(11-7)

2- اگر آرماتور فشاري تسليم نشود:

$$t_{f,ty} = \frac{0.85f_c'bd\beta_1\eta_1 + A_s'E_s(\frac{\eta_1d - d'}{\eta_1d})\varepsilon_{cu} - A_sf_y}{E_f(\varepsilon_{cu}\frac{h - \eta_1d}{\eta_1d} - \varepsilon_{f_s})(h - \eta_1d)}$$
(17-7)

بنا به توصيه ACI داريم :

(17-7)

$$t_{f,\max} = 0.75t_{f,ty}$$

3-6-10-3 بدست آوردن ضخامت در زمان تسليم آرماتور فشاري

1- براي حالت گسيختگي FRP [**20**]

$$t_{f,cy} = \frac{0.85 f_c' \beta_1 cb + A'_s f_y - A_s f_y}{f_{fr} (h - c)}$$
(۱۴-۳) که در آن

$$c = (\varepsilon_{y}h - \varepsilon_{fr}d')/(\varepsilon_{fr} + \varepsilon_{y})$$
(12-7)

2- براي حالت شكست كششي[20]

$$t_{f,cy} = \frac{0.85f_c'\beta_1\eta_2d'b + A_s'f_y - A_sf_y}{E_f(\varepsilon_f - \varepsilon_{f_s})(h - \eta_2d')}$$
(19-7)

$$\eta_2 = \varepsilon_{cu} / (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y) \tag{14-7}$$

$$\varepsilon_{\rm f} = \varepsilon_{\rm cu} (h - \eta_2 d') / \eta_2 d' \tag{14-7}$$

7-10-3- آرايش ونسبت آرماتور طولي

بوسلهام و چالال⁴⁷[21] آزمايشهاي انجام شده توسط محققين مختلف در اين زمينه را مورد بررسي قرار دادند. در تمام اين آزمايشها جهت جدا كردن اثر ميلگردهاي برشي از اثر FRP از نمونههاي فاقد ميلگرد برشي استفاده شد. شكل **(29-3)** نمودار تغييرات تقويت نيروي برشي را به عنوان تابعي از نسبت $F_{FRP} \rho_{FRP} / K_{sp}$ براي تيرهاي مستطيلي نشان ميدهد. مطابق نمودار با افزايش نسبت $E_s \rho_w / E_{FRP} \rho_{FRP}$ نيروي برشي كاهش مي يابد.

الياسيان و همكاران[22] نيز با استفاده از برنامه ANSYS به طور جداگانه به بررسي اثر آرماتور هاي طولي كششي و فشاري در تقويت برشي تير بتني باورقه FRP پرداختند.

با توجه به نمودار به دست آمده ميتوان دريافت كه با افزايش قطر آرماتور طولي كششي, نقش ورقه FRP در تقويت كاهش مييابد. همچنين تسليم آرماتور كششي به تأخير ميافتد. كه اين باعث تغيير مد

شکست خمشی انعطاف پذیر) به مد شکست بر شی می شود.

^{\-}Bousselham and Chaallal



شكل28-3- اثر أرماتور طولي كششي بر تقويت برشي تيرهاي مستطيلي فاقد أرماتور برشي[21]



شكل29-3- نمودار بار- تغيير مكان براي مقادير مختلف آرماتور طولى كششى [22]

با فراهم كردن تقويت فشاري بيشتر در سيستم، بر خلاف قسمت قبل مد شكست، از شكست برشي به شكست خمشي تبديل مي شود. يا به عبارت ديگر با افزايش سطح مقطع آرماتور فشاري، شكل پذيري عضو افزايش مييابد. نتايج به دست آمده (**ج**دول(**2-3))** نشان ميدهد كه با افزايش سطح مقطع آرماتور فشاري، اثر FRP درتقويت افزايش مييابد, اما اين مقدار بسيار ناچيز و قابل صرفنظركردن است.

فشاري	آرماتور	نسبت ت	تنش در آرماتور			سهم	تغيير	ممان Kn-m	بار ٺھايي kN	ممان Kn-m	بار ٺهايي kN		
قطر	سطح مقطع mm ²	ارماتور فشاري م	, مليور فشاري تير تقويت شده MPa	$\overline{\rho}_{min}$	$\overline{\rho}_{max}$	FRP در بار نهايي	مكان نهايي mm	تیر کنترل		ت شده	تير تقويت شده		
•	•	•	•	•/•19٣	•/•786	٩	10/50	198	304	۱۸.	۳۹۳	11	
۲Ф٩	ז/ז ו ע	/••1٧۵	۳۸۹	•/•*11	•/• ٢٥٢	11	۱۸/۴	190	361	۱۸۶	4.1	١٣	

جدول3-2- مقایسه اثر مقادیر مختلف آرماتور فشاري در درصد تقویت[22]

φ''۲ ۲	۲۲/۲ ۶	•/••٣١	۴	•/•774	•/•790	14	10	104	۳۴۸	141	397	14
φ ¹ γ ۲	۴./۲ ۲	•/••&?	۳۱۳	•/•749	•/•٢٨٩	۱۳	١٣/٧	10.	86.	144	۳۹۰	10
۹۲۰ ۲	97/4 1	•/•• • • • •	749	•/•۲٨	•/•٣٢	10	19/90	140	۳۳۷	141	890	١٧
ф ^{үд}	۹۸/۸ ۱	•/•189	198	•/•٣٢٩	•/•٣۶٩	10	۱۲/۳	١٣٧	۳۲۹	144	۳۸۸	١٨

8-10-3- آرایش و نسبت آرماتور برشی یا خاموت

طبق بررسيهاي بوسلهام و چالال[21] افزايش در نيروي برشي با افزايش نسبت $E_{s}\rho_{w}/E_{FRP}\rho_{FRP}$ كاهش مييابد. اين نوع رفتار در هر دو مد گسيختگي حاصل از جداشدگي و پاره شدن FRP قابل مشاهده است (شکل (3-31)). چالال، شهاوي و حسن(2002) در همين مورد آزمايشهايي بر روي تيرهاي عميق انجام دادند, که به نتيجهاي مشابه نتايج حاصل از تيرهاي معمولي رسيدند (شکل (3-32)).



شكل30-30- اثر أرماتور طولي برشي بر تقويت برشي تير هاي مستطيلي. الف). پاره شدكي ب) جداشدكي[21]



شكل3--31- اثر آرماتور طولي برشي بر تقويت برشي تيرهاي عميق: پاره شدگي[21]

الياسيان و همكاران[22] نيزمطالعاتي بر روي سه تير با مقادير مختلف آرماتور برشي و در فواصل متفاوت انجام دادند. نتيجه اين مطالعات در جدول (2-3) نشان داده شده است. با توجه به نتايج حاصل ميتوان دريافت كه هر چه نقش آرماتور برشي داخلي افزايش مييابد فواصل خاموت ها كمتر ميشود) نقش ورقه FRP در تقويت برشي كمتر ميشود. به عبارت ديگر ورقه FRP زماني كارآيي مناسب را در تقويت برشي خواهد داشت كه تير داراي ضعف برشي باشد.

_	<i>ه</i> ۱۵	Cm	@٣٠	Cm	@*{	o _{cm}
أرماتور عرضي	جابجايي mm	بار ٺهايي kN	جابجايي mm	بار نهايي kN	جابجايي mm	بار نهايي kN
¢۶	۸/۲۲	474	14/1	478	26/2	47.
Φ٩	19	4.9	۱۸/۴	4.1	۱۹/۵	4.9
φι۲	۱۵/۹	4.4	۱۸/۳	417	۱۵/۲	۳۹۸

جدول3-3- مقايسه اثر مقادير مختلف آرماتور برشي در درصد تقويت[22]

a/d) تأثير نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر (a/d)

شكل **(3-33)[21**] نمودار تقويت نيروي برشي- نسبت دهانه برشي را نشان مي دهد. سه ناحيه مجزا در نمودار قابل مشاهده است:



شكل32-32- تأثير نسبت دهانه برشى به عمق مؤثر [21]

۴- ناحیه منطبق با a/d کمتر از 2/5 که در آن گسیختگي تحت تأثیر پارگي FRP رخ مي هد.

۵- ناحيه منطبق با a/d بزرگتر از 3/2 كه گسيختگي با جدا شدن FRP ايجاد مي شود.

۶- ناحیه انتقالي با a/d بزرگتر از 2/5 و کمتر از 3/2 که در آن گسیختگي مي تواند ناشي از پاره شدن و یا گسیختگي FRP باشد.

به نظر مي رسد كه سـهم FRP در تيرهاي معمولي از لحاظ افزايش در نيروي برشـي بارزتر از تيرهاي عميق (a/d<**2/5)** باشد. تأثير مقياس بر تيرهاي بتنآرمه فاقد آرماتورهاي برشي, به دليل ايجاد تركهاي قطري عريض كاملا محرز است (آيين نامه ACI-ASCE 445). اين پديده درمورد تيرهاي RC تقويت شده با FRP نيز مشاهده مي شود. در آزمايش هاي انجام شده در اين مورد نيز جهت جلوگيري از اثر ميلگردهاي برشي از نمونه هاي بدون خاموت استفاده شد. با توجه به شكل (**34-36)** با كاهش عمق موثر به ويژه در عمق موثر كوچكتر از **300**mm كه با جدا شدن FRP گسيختگي مي شوند درصد نيروي برشي افزايش مي يابد [**21]**.



شكل3-33- اثر مقياس در تقويت برشى[21]

FRP مودهاي گسيختگي برشي درتيرهاي تقويت شده با

FRP كسيختكي برشي ناشي از پاركي ورقه

اين نوع گسيختگي اغلب به همراه ايجاد ترك برشي-كششي قطري رخ ميدهد. دربرخي موارد اين ترك مورب ممكن است به صورت ناگهاني ايجاد شود. با عريض شدن ترك قطري, ورق FRP سر انجام به كرنش نهايي خود ميرسد, كه غالباً در انتهاي پايين ترك اتفاق ميافتد. پاره شدن FRP در طول ترك قطري روي سطح بتن, ايجاد شده و سبب گسيختگي كامل تير به صورت ترد ميگردد. عدم پيوند⁴⁸ نسبي در دوسطح كناري ترك غالباً قبل از گسيختگي FRP اتفاق ميافتد ولي در نهايت گسيختگي در اثر پاره شدن FRP ايجاد ميشود. بنابر اين عدم پيوند FRP نميتواند بر ظرفيت برشي اين مد گسيختگي اثر بگذارد. داده هاي آرمايشي موجود ولي محدود نشان ميدهد كه همواره همه تيرهاي دور پيچ شده يا برخي از تيرهاي ژاكت شده U شكل در اين مد قرو ميريزند (شكل (3-35ه)) [23].

1-Debonding

FRP -۱۱-۳ شکست برشی بدون پاره شدن

فرایند شکست در این مد، مشابه شکست ناشی از پارگی FRP است، به جز اینکه FRP در این مد گسیخته نمیشود.

برخي از نمونههاي مقاوم شده با الياف آراميد در اين مد شكست, گسيخته ميشوند. AFRP به تير هاي شكسته شده اجازه ميدهد تا بار قابل توجهي را حمل كند[23].

FRP - كسيختكى برشى ناشى از عدم چسبندكى ورقه

يك تير بتني تقويت شده در برش ممكن است در اثر از بين رفتن پيوند بين FRP و بتن گسيخته شود در اين حالت. تير به سرعت فرو ميريزد. شكلپذيري تير در اين مد غالباً محدود است. نتايج آزمايش هاي موجود نشان ميدهد كه اكثر تيرهاي تقويت شده با پيوندهاي FRP جانبي و ژاكتهاي U شكل در اين مد فرو ميريزند[**23].**



شكلa -34-3 - 2 كشش برشي همراه با پاره شدن b،FRP- كسيختكي برشي نا شي از عدم پيوند[12]

4-11-3-گسيختگي نزديك مهار مكانيكي

اگر براي مهار FRP در وجوه تيربتن آرمه, از مهارهاي مكانيكي استفاده شود، اين امكان وجود دارد كه در نزديكي محل مهار شده گسيختگي رخ دهد. به طور مثال مهارهاي مكانيكي استفاده شده براي مهار ژاكتهاي U شكل، زير بال تيرهاي T شكل ممكن است سبب لايه لايه شدن⁴⁹ FRP درمجاورت بال شود[**23**].

شكل(**36-3)** برخي از نمونههاي گسيختگي برشي درتير هاي تقويت شده با FRP را نشان ميدهد.

\-Delamination



A, Anchorage



R, Fiber rupture



AR, Anchorage and fiber rupture



A+R, Fiber rupture after anchorage failur

شكل3-35- نمونه هاي كسيختكي برشي در تير هاي تقويت شده با FRP [24]

فصل چهارم

چسبندگي بتن و FRP

1-4- پیشگفتار

افزايش ظرفيت باربري و رفتار مطلوب در هنگام شكست تيرهاي بتن مسلح تقويت شده با مواد پليمري اليافي، بستگي به انتقال تنشهاي چسبندگي بين سيستم FRP و تير بتني دارد. انتقال تنش هاي چسبندگي از طريق سه قسمت، پليمر اليافي، چسب و پوشش بتن (لايه بتن بيرون از منطقه محصور شده توسط خاموتها) صورت ميگيرد. افزايش اين تنشها باعث ايجاد شكست, در يكي از اين سه لايه خواهد شد. در بين اين سه ماده، پوشش بتن كمترين مقاومت را داراست، بنابر اين شكست معمولاً در اين ناحيه رخ ميدهد. شكست چسبندگي در لايه چسب به ندرت مشاهده شده است و ميتوان با استفاده از چسب مناسب از وقوع آن جلوگيري كرد.

2-4- تنش چسبندگي برشي

براي ايجاد تعادل در تغييرات تنش محوري صفحات پليمري اليافي، تنش چسبندگي برشي در چسب به وجود ميآيد. اين تنش ها از طريق لايه چسب به بتن منتقل ميشوند. از تعادل يک المان از ورق پليمري اليافي در جهت طولي تير به طول dz مطابق شکل**(1-4)** رابطه زير به دست ميآيد**[25].**

(۱-۴) در رابطه فوق:

$$\tau = t_{\rm p} \frac{\mathrm{dN}_{\rm p}}{\mathrm{dz}} = t_{\rm p} \mathrm{E}_{\rm p} \frac{\mathrm{d\varepsilon}_{\rm p}}{\mathrm{dz}}$$

 N_{p} ، E_{p} ، t_{p} ، r_{p} و e_{p} به ترتيب تنش برشي چسبندگي، ضخامت، مدول الاستيسيته, تنش محوري و كرنش محوري متوسط صفحه RP است.



شكل-1-4 تنش برشي چسبندگي در سطح مشترك ورق پليمري اليافي و بتن[25]

3-4- انواع شكست چسبندگي⁵⁰

در تير هاي تقويتشده در برش, كه پليمر هاي اليافي بر روي دو سطح جانبي تير چسبانده ميشوند, به علت رشد ترك به موازات صفحه پليمري اليافي، در طول سطح مشترك چسب و بتن يا پوشش بتن شكستي رخ ميدهد كه از محل تنش بحراني شروع شده و به سمت انتهاي لايه FRP پيش ميرود. حالت ديگر شكست چسبندگي، شكستي است كه به علت تمركز تنش در انتهاي صفحه پليمري، از انتهاي اين لايه شروع ميشود, اين حالت شكست بيشتر در تير هاي تقويتشده در خمش مشاهده ميشود. از ديگر شكستهاي چسبندگي ميتوان به شكست در سطح مشترك چسب- بتن، پليمر اليافي- چسب و شكست بن به همراه جدا شدن لايه FRP اشاره نمود.

4-4- رابطه تنش چسبندگي- لغزش⁵¹

روابط تنش چسبندگی-لغزش مختلفی توسط محققان برای سطح چسبندگی پلیمر های الیافی با بتن ارائه شده است. در میان این مدلها، مدل الاستیک خطی استفاده شده توسط اپریل و همکاران⁵²[26] مطابق شکل**(4-2**الف) و مدل الاستو پلاستیک ارائه شده توسط هومام و همکاران⁵³[26] مطابق شکل**(4-4**ب), معمولتر هستند.



شكل 2-4- رابطه تنش چسبندگي لغزش در سطح مشترك اتصال پليمر هاي اليافي كربن; الف) الاستوپلاستيك ب) الاستيك خطي [26]

v-Anchorage failure

- r-Bond stress-slip
- r-Aprile et al(2001)

v-Homam et al(2000)

پار امتر هاي استفاده شده در اين مدلها شامل ماكزيمم تنش برشي, au_{max} , لغزش در تنش چسبندگي ماكزيمم، S_{max} ، لغزش نهايي، S_{ult} ، ميباشند. شيب خط در نمودار هاي شكل**(2-4)** مدول لغزش، E_b ، ناميده شده و بر اساس سختي برشي چسب ، G_a ، از رابطه زير به دست ميآيد.

$$E_b = \frac{G_a}{t_a} \qquad , \quad G_a = \frac{E_a}{2(1 - V_a)} \tag{7-4}$$

E_a, E_a و V_a و V_a به ترتيب مدول الاستيسيته، ضخامت و ضريب پواسون لايه چسب مي باشند. با استفاده از آزمايش هاي انجام شده توسط هومام S_{max} τ_{max} و S_{ut} براي پليمر هاي کربني به ترتيب **3/5** مگا پاسکال، 0/01 و 0/5 ميليمتر و براي پليمر هاي شيشه 2/5 مگا پاسکال، 0/01 و 0/67 ميليمتر در نظر گرفته شده است[**26**].

ر ابطه تنش چسبندگي- لغزش خطي الاستيک، بر اي حالتي که شکست در چسب رخ مي دهد، مناسب مي باشد.

اين حالت زماني اتفاق مي افتد كه مقاومت برشي چسب كم باشد. در صورتيكه مقاومت برشي چسب مناسب باشد. به علت كم بودن مقاومت برشي بتن، پوشش بتن از سطح تير جدا ميشود. براي اين نوع شكست مدل الاستيك- پلاستيك جوابهاي بهتري ميدهد.

5-4- تعيين مقاومت برشي چسبندگي در سطح مشترک چسب-بتن و چسب-پليمر اليافي

براي تعيين مقاومت برشي چسبندگي در سطح مشترک چسب-بتن مطابق شکل (4-4) دو مجموعه آزمايش برش-کشش و برش-فشار توسط آردوني و ناني⁵⁴[27] انجام شد. ابتدا نمونه هاي بتني منشوري 50*15*15 سانتيمتر ساخته شدند (مقاومت فشاري نمونه ها 30 مگا پاسکال بود). پس از عمل آوري، نمونه هايي با زواياي مختلف شامل زاويه هاي 60 ، 40 ، 20 ، بر لي آزم الحيش کنشري و 70 ، 60 ، 40 ، بر لي آزم الحيش فشد اري مور دبر روسري قرار رگرفت. نر تر لي حي آزمايش ها با توجه به رابطه هاي زير در جدول (4-1) آورده شده است [27].

$$\tau = \frac{F \sin \alpha}{b \times a} \qquad , \quad \sigma = \frac{F \cos \alpha}{b \times a} \tag{(7-4)}$$

در روابط فوق F، نيروي كششي يا فشاري نهايي و a و b به ترتيب طول و عرض سطح چسب ميباشد.



شكل4-3- نمونه هاي آزمايش شده الف)كشش برش،ب)فشار برش[27]

زاە بە بې ش		ايش كششي	آزم	آزمايش فشاري						
درجه	σ (Mpa)	τ (Mpa)	حالت شكست	σ (Mpa)	τ (Mpa)	حالت شكست				
۲.	۳/۱	١/١	شكست بتن	-	-	-				
۴.	۲/۱	١/٢	شکست بتن	_۲۸/۱	۲٣/۶	شکست در سطح مشتر ك				

جدول4-1- خواص مكانيكي سطح مشترك بتن - چسب [27]

v-Arduini and Nanni(1997)

۶.	۲/۱	۲/۱	شكست بتن	-11/1	۱۹/۳	شکست در سطح مشترك
٧.	-	-	-	-۴/V	۱۲/۸	شکست در سطح مشتر ك

با استفاده از اعداد به دست آمده در جدول (1-4) و رسم منحني پوش شكست مور كلمب، مقاومت برشي پيوستگي تقريبا بر ابر 5 مگا پاسكال به دست آمد.

مطابق با آز مايش فوق، آز مايشي بر اي پليمر هاي اليافي با همان مواد و هندسه به منظور بررسي خواص سطح مشترک چسب با صفحه پليمري انجام شد. ابتدا دو صفحه پليمري به سطح بتن و سپس دو صفحه به يکديگر چسبانده شدهاند مقاومت برشي در سطح مشترک چسب و صفحات پليمري اليافي، سه بر ابر مقاومت برشي سطح مشترک چسب و بتن به دست آمد.

6-4- طول مهاري مؤثر

كاربردهاي تجربي و تئوريك متعددي براي بررسي مقاومت چسبندگي اتصال پليمر هاي اليافي به بتن مسلح انجام شده است. برخي آزمايشها همانگونه كه در شكل**(4-4)** مشاهده ميشود، آزمايشهاي برشي ساده و مضاعف ميباشند.كار هاي تئوريك انجام يافته, هم به آناليز مكانيزم شكست و هم به مدلسازي بر اساس نتايج و اطلاعات تجربي، با اختياركردن فرضيههاي سادمشونده ميپردازد**[28].**

نيروي كششي در پليمر هاي اليافي در يک طول كوتاه نزديک بار اعمالي، از طريق تنشهاي برشي در چسب به بتن منتقل ميشوند. با افزايش بار ها، توزيع تنش در ناحيه ابتدايي اتصال يكنواخت تر ميگردد. و اين بدان علت است كه هيچ نيرويي از صفحه پليمري به بتن منتقل نميشود. تركها در بتن نزديک بار اعمالي سبب ميشوند, ناحيه چسبندگي فعال به سمت ناحيه جديدي كه از محل اثر بار دورتر است، منتقل گردد. جابهجا شدن ناحيه چسبندگي فعال در هر لحظه به اين معني است كه فقش قسمتي از طول اتصال، مؤثر بوده و نيروي وارد را به بتن منتقل مينمايد.





شكل4-4- آزمايش هاي چسبندگي برشي, الف) آزمايش برشي ساده, ب) آزمايش برشي مضاعف, ج) پلان[28]

نكته قابل توجه در اتصال صفحات تقويتي به بتن اين است كه با هر مقدار افزايش در طول چسبندگي كه در شكل**(4-4)** با L نشان داده شده است. لزوماً به مقاومت چسبندگي اتصال افزوده نخواهد شد. با توجه به اين موضوع مفهوم طول مؤثر چسبندگي مطرح ميشود. اين طول مقداري است كه افزايش بيشتر آن، مقاومت چسبندگي را افزايش نميدهد. البته بايد يادآور شد كه افزايش طول چسبندگي ميتواند شكلپذيري قبل از شكست را افزايش دهد. اين پديده به طور كامل، با رفتار چسبندگي فولاد داخل مقطع متفاوت است. در مورد فولادهاي داخلي، اگر مقدار پوشش بتن كافي باشد، ميلگردهاي طولي براي مقاومت كششي كاملشان طراحي ميشوند[**28].**

7-4- مدل هاي موجود براي مقاومت چسبندگي

در سال**ه اي** اخير، مدلسازيهاي گسٽردهاي در زمينه مقاومت چسبندگي انجام شده است که ميتوان آنها را به سه دسته زير تقسيم نمود:

1-7-4- مدل هاي تجربي
$$r_{u}$$
 وو 55 (1997) لي و وو 55 (1997) و متوسط تنش برشی ناشی از چسبندگی, τ_{u} , و نیز رابطه ارائه شده تجربی بین طول چسـبندگی (cm) و متوسط تنش برشی ناشی از چسبندگی, τ_{u} , و نیز مقاومت چسبندگی نهایی, P_{u} , توسط هیرویوکی و وو[۲۹] به صورت زیر بیان می شود.
 $\tau_{u} = 5.88 L^{-0669} Mpa$

$$P_u = \tau_u b_p L \tag{$\Delta-$}$$

2-1-7-4 مدل تاناكا⁵⁶ (1997)

تاناكا[**28**] رابطه زير را براي تعيين متوسط تنش برشي چسبندگي ارائه نمود.
(۴-۴)
در اين رابطه L بر حسب ميليمتر است. حداكثر مقاومت چسبندگی اتصال يعنی
$$P_u$$
 با ضرب كردن τ_u , در τ_u ور اين رابطه L بر حسب ميليمتر است. حداكثر مقاومت چسبندگی اتصال يعنی P_u با ضرب كردن τ_u

-7-4-3-1.5- مدل مائدا و همکاران⁵⁷ (1997)

v- Hiroyuki and Wu(1997)

r- Tanaka(1997)

r-Maeda et al(1997)

در این رابطه, E_p , بر حسب مگا پاسکال و t_p , بر حسب میلیمتر به ترتیب مدول الاستیسیته و ضخامت صفحه تقویتی چسبانده شده بر روی بتن هستند. حداکثر مقاومت چسبندگی, P_u , از حاصلضرب τ_u , در سطح مؤثر چسبندگی یعنی $b_p.\tau_u$ به دست میآید. طول مؤثر چسبندگی از رابطه زیر حاصل میشود[۲۸]. $L_e = e^{0.13 - 0.580/nE_pt_p}$ mm

در رابطه فوق $E_p t_p$, بر حسب میلیمتر-گیگا پاسکال است.

$$p_{u} = \begin{cases} 0.78b_{p}\sqrt{2GE_{p}t_{e}} & \text{if } L \ge L_{e} \\ 0.78b_{p}\sqrt{2G_{f}E_{p}}\frac{L}{L_{e}}\left(2-\frac{L}{L_{e}}\right) & \text{if } L < L_{e} \end{cases}$$

$$(9-9)$$

در این رابطه
$$E_p t_e$$
 بر حسب میلیمتر – مگا پاسکال بوده و p_u بر حسب نیوتن به دست میآید. همچنین
برای محاسبه L_e (طول مؤثر چسبندگی) و G_f (انرژی گسیختگی) می توان از روابط زیر استفاده کرد[۲۸].

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{4f_{ctm}}} mm \tag{1.-f}$$

$$G_f = c_f K_p^2 f_{ctm} \quad Nmm/mm^2 \tag{11-f}$$

در این روابط f_{ctm} متوسط مقاومت کششی سطح بتن(بر حسب مگا پاسکال) است که مقدار آن با انجام آزمایش استاندارد کشش تعیین می شود. c_f یک مقدار ثابت بوده که از رگرسیون خطی نتایج آزمایش

v-Holzenkampfer(1994)

برش دو طرفه یا آزمایشی مشابه آن به دست میآید. و K_p یک فاکتور هندسی است که به عرض صفحه چسبانده شده, b_p , و عرض عضو بتنی, b_c , (هر دو بر حسب میلیمتر) بستگی دارد[۲۸].

$$K_p = \sqrt{1.125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \tag{17-f}$$

⁵⁹مدل تالجستن

$$P_u = \sqrt{\frac{2E_p t_p G_f}{1 + \alpha_T}} b_p \tag{17-4}$$

$$\alpha_T = \frac{E_p t_p}{E_c t_c} \tag{14-4}$$

در این روابط E_c و t_c مدول الاستیسته و ضخامت عضو بتنی هستند [۲۸].

3-2-7-4 مدل يوان و وو

در این مدل, بررسی چسبندگی FRP و بتن بر اساس آنالیز مکانیک شکست خطی الاستیک صورت پذیرفت. نتایج مطالعه خطی به رابطهای مشابه رابطه تالجستن[۱۵] منتهی شد، با این تفاوت که اثر عرض صفحه چسبانده شده و نیز عرض مقطع بتنی, با جایگزینی α_Y به جای α_T در رابطه فوق وارد گردید[۲۸].

$$\alpha_{Y} = \frac{b_{p}E_{p}t_{p}}{b_{c}E_{c}t_{c}}$$
(1Δ-4)

در رابطه بالا, E_p ,b_p و E_p ,b_r و E_c ,b_c و E_c ,b_c و E_c ,b_c و FRP, و E_c ,t_c و t_c ,b_c به ترتیب عرض, مدولالاستیسیته و ضخامت نمونه بتنی میباشد.

همچنین معادله مکانیک شـکسـت خطی برای پنج حالت مختلف از رابطه بین برش- لغزش, مطابق نمودار(۴-۵)، حل شد. در میان آنها حالت خطی صعودی و پس از آن نزولی مشابه شکل(۴–۱۱د), به واقعیت نزدیک تر است. لذا برای این حالت, حداکثر ظرفیت باربری به صورت زیر تعیین گردید[۲۸]. $P_u = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_2} \frac{\delta_f}{\delta_{f} - \delta_1} \sin(\lambda_2 a)$

v-Taljsten(2003)

در این رابطه, au_f , حداکثر مقدار تنش چسبندگی در منحنی برش- لغزش و δ_1 و δ_f به ترتیب مقدار لغزش متناظر با au_f و حداکثر لغزش میباشد.



شكل4-5- نمودار هاي تنش چسبندگي برشي- لغزش در محل اتصال پليمر هاي اليافي با بتن[28]

مقدار a در معادله(۴–۱۶) از حل معادله زیر به دست میآید[۲۸].

 $\tanh[\lambda_1(L-a)] = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tan(\lambda_2 a) \tag{1V-F}$

و λ_2 و λ_2 توسط روابط زیر تعیین میشوند. λ_1

$$\lambda_1^2 = \frac{\tau_f}{\delta_1 E_p t_p} (1 + \alpha_Y) \tag{1A-F}$$

$$\lambda_2^2 = \frac{\tau_f}{(\delta_f - \delta_1) E_p t_p} \left(1 + \alpha_Y \right) \tag{19-F}$$

و سرانجام طول مهاری مؤثربه صورت رابطه زیر ارائه گردید[۲۸].

$$L_{e} = a_{0} + \frac{1}{2\lambda_{1}} Ln \frac{\lambda_{1} + \lambda_{2} \tan(\lambda_{2}a_{0})}{\lambda_{1} - \lambda_{2} \tan(\lambda_{2}a_{0})}$$
($\Upsilon \cdot - \Upsilon$)

$$a_0 = \frac{1}{\lambda_2} \sin^{-1} \left[0.97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right] \tag{(1-f)}$$

4-2-7-4 مدل نيوبور و راستسى

برای مقاومت چسبندگی برشی, با در نظر گرفتن رابطه برشی- لغزش به صورت مثلثی مطابق شکل (۴-۵د) و همچنین طول مؤثر مهاری, روابط زیر توسط نیوبور و راستسی ارائه شد[۲۸].

$$p_{u} = \begin{cases} 0.64K_{p}b_{p}\sqrt{E_{p}t_{p}f_{ctm}} & \text{if } L \ge L_{e} \\ 0.64K_{p}b_{p}\sqrt{E_{p}t_{p}f_{ctm}}\frac{L}{L_{e}}\left(2 - \frac{L}{L_{e}}\right) & \text{if } L < L_{e} \end{cases}$$

$$(\Upsilon \Upsilon - \Upsilon)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2f_{ctm}}} \tag{YY-F}$$

 E_p در رابطه فوق, f_{ctm} , متوسط مقاومت كششي بتن بر حسب مگاپاسكال است كه بر ابر $\sqrt{f_c'}$ 0.53 در نظر گرفته ميشود. و f_{ctm} و f_{ctm} , به ترتيب مدولالاستيسيته بر حسب مگاپاسكال و ضخامت ورق FRP بر حسب ميليمتر ميباشند. مقدار K_p دررابطه (1-4) از رابطه زير حاصل ميشود. و (12-22) از رابطه زير حاصل ميشود.

$$K_p = \sqrt{1.125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \tag{(YF-F)}$$

تنش وارد می شود تا رسیدن به صفر در انتهای دیگر) ونجرمرت رابطه زیر را برای طراحی پیشنهاد نمود[۲۸].

$$P_U = 0.5Lb_P f_{ctm} \tag{(7.7)}$$

در اين رابطه, P_u, مقاومت چسبندگي نهايي, f_{ctm}, مقاومت كششي سطح بتن كه برابر مدول گسيختگي بتن در نظر گرفته مي شود, و L مول اتصال ميباشد.

$$\tau_u = \frac{\tau_{max}}{2} = \frac{2.7}{1 + K_1 \tan 33^\circ} \quad Mpa$$
 (YV-Y)

در این رابطه، پارامتر بدون بعد K_1 , از رابطه زیر به دست می آید.

$$K_1 = t_P \sqrt[4]{\frac{K_n}{4E_p I_p}} \tag{YA-F}$$

$$K_n = E_a \frac{b_a}{t_a} \tag{Y9-F}$$

در این رابطه, E_a و b_a به ترتیب مدول الاستیسیته، عرض و ضخامت لایه چسب, و I_p ممان Ip و این رابطه, FRP میباشد.

7-4-3-3-4 مدل خاليفا و همكاران (1998)

در این مدل مقاومت چسبندگی FRP و بتن به صورت تابعی از $\left(f_{c}^{\prime}
ight)^{2/_{3}}$ با رابطه زیر تعریف میشوند[۲۸].

$$\tau_u = \frac{110.2}{10^6} \left(\frac{f'_c}{42}\right)^{2/3} E_p t_p \quad Mpa \tag{(7.-4)}$$

در رابطه فوق, au_u , تنش برشی مجاز قابل حمل توسط سطح مشترک بتن و صفحات پلیمری الیافی و au_u و au_v , t_p و au_p , به ترتیب مدولالاستیسیته بر حسب مگاپاسکال و ضخامت ورق FRP بر حسب میلیمتر میباشند.

4-3-7-4- مدل چن و تنگ این مدل از ترکیب آنالیزهای مکانیک شکست و شواهد و مدارک تجربی و آزمایشی تشکیل شده است و پیشبینی نسبتاً دقیقی دارد. در این مدل نیز رفتار برش- لغزش اتصال صفحات FRP به بتن را می توان با یک مدل مثلثی بیان کرد. برای این اتصال، مقدار $\delta_f = 0.02mm$ (لغزش متناظر با نقطه پیک نمودار) و $\delta_f = 0.2mm$ می باشد. به دلیل

$$P_{u} = \begin{cases} \tau_{f} b_{p} / \lambda & \text{if } L \ge L_{e} \\ (\tau_{f} b_{p} / \lambda) \sin(\lambda L) & \text{if } L < L_{e} \end{cases}$$

$$(\Upsilon^{1} - \Upsilon)$$

$$L_e = \frac{\pi}{2\lambda} \tag{(77-F)}$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f}{\delta_f E_p t_p} (1 + \alpha_Y) \tag{(TT-F)}$$

مقاومت پيوستگي نهايي، به مقاومت كششي سطح بتن بستگي دارد. نتايج آزمايشگاهي مختلف نشان ميدهد كه مقاومت پيوستگي با $\frac{b_p}{b_c}$ متناسب ميباشد. نسبت عرض صفحه پليمري اليافي به عرض عضو بتني, $\frac{b_p}{b_c}$, نيز در مقدار مقاومت پيوستگي تاثيرگذار است. با تحليل رگرسيون بر روي آزمايش ها ، مقاومت پيوستگي ز هايي با ضريمي رض صفحه پ لم يمري ال پيافي م تصل شده به بن تمن, β_p , نسبت خطي دارد كه از رابطه زير به دست ميآيد[28].

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / b_c}} \tag{(\%-\%)}$$

.با در نظر گرفتن روابط بالا و تحليل رگرسيون بر روي نتايج به دست آمده، مقاومت پيوستگي نهايي مطابق رابطه زير تعيين ميشود[**28**].

$$P_u = 0.427\beta_p \beta_l \sqrt{f_c'} b_p L_e \tag{7.5}$$

در رابطه فوق, طول مهاري موثر و ضريب طول موثر, eta_l , از روابط زير به دست ميآيند.

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f_c'}}} \quad (mm) \tag{17.4}$$

$$\beta_l = \begin{cases} 1 & \text{if } L \ge L_e \\ \sin[\pi L/(2L_e)] & \text{if } L < L_e \end{cases}$$

$$(^{\texttt{rv}_\texttt{F}})$$

E_p و t_p, به ترتيب مدول الاستيته بر حسب مگا پاسکال و ضخامت صفحههاي پليمري اليافي بر حسب ميليمتر, L و L_e, به ترتيب طول و طول موثر پيوستگي بر حسب ميليمتر و '*f*ر, مقاومت فشاري بتن بر حسب مگا پاسکال ميباشند.

با استفاده از روابط آماري بر روي نتايج آزمايش.ها و حاشيه اطمينان **0/95** به منظور ارائه روابط طراحي، عدد **0/427** در رابطه**(2-32)** به عدد **0/315** كاهش داده شده است، در نتيجه مقاومت پيوستگي برشي طراحي از رابطه زير به دست ميآيد[**28**].

$$P_u = 0.315\beta_p \beta_l \sqrt{f_c'} b_p L_e \tag{(\%-\%)}$$

با بررسي آزمايش هاي انجام شده، باري كه باعث ايجاد ترك در عضو مي شود، حدود 60 درصد بار نهايي مي باشد. در نتيجه، بار بهر مبرداري از رابطه زير به دست مي آيد[28].

$$P_u = 0.2\beta_p \beta_l \sqrt{f_c'} b_p L_e \tag{(7.4-4)}$$

با توجه به رابطه فوق براي اينكه نيروي بيشتري از صفحه پليمري اليافي به بتن منتقل شود بايد از صفحههاي پليمري اليافي با ضخامت كمتر و مدول الاستيته بيشتر استفاده شود.

فصل پنجم

روش هاي پيش بيني ظرفيت برشي تير هاي مقاومشده با FRP

1-5- ييشگفتار

تاكنون بررسيهاي متعددي جهت تخمين ظرفيت برشي تيرهاي بتن آرمه مقاومشده با FRP انجام شده است و مدلهاي تحليلي بر اساس فرضيات متفاوت تئوري و نتايج آزمايشگاهي ارائه شدهاند.

تريانتافيلو (1998)⁶⁰ مدلي تئوري براي محاسبه ظرفيت برشي تيرهاي مقاومشده با FRP ارائه نمود. بعدها اين مدل پيشنهادي با استفاده از نتايج 75 آزمايش اصلاح گرديد, كه نتيجه آن تعيين عبارتي براي پيش بيني كرنش مؤثر در لايه FRP بود. در سال 2001 ماتهيز و تريانتافيلو⁶¹ اصلاحي جزيي بر روي عبارت كرنش مؤثر ارائه شده توسط تريانتافيلو و آنتونوپولوس (2000)⁶² اصلاحي از نشان دادند كه علاوه بر عوامل متعدد مؤثر در تقويت برشي، كرنش مؤثر PRP همچنين تابعي از نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر تير مي باشد. ديگر محققان نيز تلاش هاي فراواني جهت ارائه روشي مناسب براي مقاوم سازي برشي با FRP انجام دادند كه منجر به تدوين دستور العمل هايي در اين زمينه, در آيين نامه هاي مختلفي همچون مدانه انجام دادند كه منجر به تدوين دستور العمل هايي در اين زمينه, در آيين نامه هاي مختلفي همچون مدانه

اكثر محققان، تركيبات _{FRP} استفاده شده براي مقاومسازي برشي را به عنوان خاموتهاي خارجي در نظر گرفته و با فرض اينكه _{FRP} ميتواند مستقيماً در برابر نيروهاي برشي مقاومت كند، از روشهاي قديمي طراحي خاموتها همچون مدل تراس و تئوري ميدان فشاري، براي پيشبيني سهم برشي FRP استفاده نمودند. تفاوت عمده بين روابط مختلف در پيش بيني كرنش مؤثر FRP و تنش در لحظه شكست بود[**30**].

2-5- بررسي مدلهاي مختلف ارائه شده در تقويت برشي

5-2-5- مدل شبيه سازي خرپايي يا STRUT & TIE

اين روش كه مبناي اكثر آيين نامه هاست براي نخستين بار توسط يك مهندس سوئيسي به نام ريتر ⁶³ در سال **1989** به كار برده شد. در اين مدل. نقش آرماتو هاي برشي در تير هاي بتن آرمه به نقش اعضاء قطري و قائم خريا تشبيه ميشود. در يك خرياي ساده مطابق شكل (5-1 الف), اعضاء فوقاني و تحتاني به ترتيب تحت فشار و كشش و اعضاء مايل نيز متناوباً تحت فشار و كشش هستند. عمل آرماتور هاي برشي مايل را ميتوان مطابق تصوير (5-1ب) به رفتار خرياي شكل (5-1 الف) نشييه منود. در اين حالت آرماتور هاي برشي نقش اعضاء كششي و بتن جان، نقش اعضاء فشاري را بازي

v-Triantafillou (1998)

\-Ritter(1989)

r-Matthys and Triantafillou (2001)

r-Triantafillou and Antonopoulos (2000)

ميكنند. براي اين منظور آرماتور هاي برشي در بالا و پايين به تقويت هاي طولي فشاري و كششي مهار ميشوند[**31**].



(ب)

(الف)

شكل 1-5- تشابه خربا براي آرماتور برشي تيرها [31]

1-2-5-1 اختلاف بين FRP و خاموت هاي فولادي

با در نظر گرفتن مهار هاي مناسب در اتصال ميلگردهاي برشي به آرماتور هاي طولي, ميتوان مقاومت كششي را تقريباً براي ارتفاع كامل آنها متصور شد و فرض نمود كه آرماتور هاي برشي در عرض ترك قطري به نقطه تسليم خود ميرسند. مطابق تحقيقات نيلسون⁶⁴(1997)[32] خاموت هاي فلزي داراي 4 عملكرد مجزا براي افزايش مقاومت برشي اعضاء بتنآرمه ميباشند. البته بايد خاطر نشان كرد كه اگرچه آرماتور هاي عرضي مقاومت برشي تير ها را افزايش ميدهند، اما قبل از تشكيل تركهاي قطري تأثير محسوسي بر رفتار اين اعضاء ندارند. اندازه گيري هاي متعدد نشان دادهاند كه قبل از ايجاد تركهاي قطري، آرماتور هاي برشي عملاً خالي از تنش ميباشند و تنها پس از تشكيل تركهاي قطري وارد عمل شده و 4 وظيفه عمده زير را انجام ميدهند(شكل (2-3))[32].

- ۵- مقاومت در برابر بخشي از نيروي برشي (۷_s)
- ۶- ممانعت از توسعه و باز شدن تركهاي قطري و كاهش نفوذ آنها به ناحيه فشاري كه باعث افزايش v_c مىشود.
- ٧- جلوگيري از عريض شدن تركها به طوريكه سطح دو ترك در تماس بسته باقي ميمانند, اين عمل نيروي سطح مشترك (٧_i) قابل توجهي را ايجاد ميكند.
- ٨- ايجاد پيوند محكمتر ميلگردهاي طولي به هسته بنن كه در نتيجه آن علاوه بر افزايش مقاومت برشي اين ميلگردها (٧٥), يكپار چگي بيشتري در مقطع به وجود ميآيد.

v-Nilson(1997)

بنابراين ميتوان گفت خاموتها نه تنها به طور مستقيم در برابر نيروي برشي مقاومت ميکنند بلکه سهم بتن را نيز افزايش ميدهند.

سيستمهايFRP داراي ويژگي و رفتار متفاوتي نسبت به آرماتور هاي برشي هستند, چنانچه صفحات FRP براي افزايش مقاومت برشي به صورت پوشش u شكل استفاده شوند, ميتوان فرض نمود كه اين صفحات در زير تير مهار شده و در انتهاي بالايي آزاد هستند و در صورتيكه صفحات FRP تنها در دو طرف تير نصب شوند, براي آنها هيچ مهاري در بالا و پايين نميتوان متصور شد. لذا بدون وجود مهار هاي معين، فرضيه مورد استفاده در آييننامه ACI و بسياري از روابط موجود در تعيين سهم برشي صفحات PRP, مبني بر توسعه مقاومت برشي در امتداد ارتفاع كامل FRP فاقد اعتبار است.



شكل2-2- نيروهاي ايجاد شده در محل ترك قطري در تير بدون FRP [32]

استفاده از الگوي دورپيچ كامل FRP معمولاً غير عملي است, با اين وجود، در اين حالت ميتوان FRP را به صورت مهار شده فرض نمود. در همه نمونههاي ديگر، چسبندگي بين بتن و صفحات FRP تعيين كننده تنش موجود در آن است. لذا تنش در FRP در امتداد الياف يكنواخت نميباشد، تنش نزديك ترك برشي زياد و در فاصلهاي دورتر از ترك اين مقدار بسيار كم و قابل اغماض است. به اين ترتيب ميتوان نتيجه گرفت كه FRP تنها در يك ناحيه محدود مؤثر بوده و در خارج اين ناحيه هيچ تأثيري بر برش ندارد.

عمل اصلي صفحات FRP محدود نمودن توسعه تركها و كاهش عرض آنهاست. نيروي كششي موجود در FRP يك نيروي فشاري برابر و با جهت مخالف بين سطوح ترك ايجاد نموده و باعث افزايش اصطكاك برشي(v_i), در ترك ميشود(شكل(**2-3)).** اين صفحات همچنين ميتوانند با جلوگيري از نفوذ تركها به داخل ناحيه فشاري, v_{cz} را افزايش دهند. در صورت استفاده از FRP در اطراف و زير تير, اين صفحات ميتوانند مقاومت برشي ميلگردهاي طولي را نيز بهبود بخشند.

به طور كلي ميتوان گفت نيروي كششي موجود در FRP باعث ايجاد نيروي فشاري بين سطوح ترك بتن ميشود (شكل (**3-5))** و بنابر اين FRP نميتواند مانند ميلكر دهاي عرضي مستقيماً در بر ابر برش مقاومت نمايد و تنها سهم برشي بتن را افزايش ميدهد. افزايش سهم بتن به منظور مقاومت در بر ابر برش توسط FRP, معمولاً به عنوان سهم FRP (V_{FRP}), به صورت جداگانه در نظر گرفته شده و از افزايش مقدار _{Va}و _V توسط آن چشم پوشي ميشود[**32**].



شكل3-5- نيروهاي ايجاد شده در محل ترك قطري توسط FRP [32]

2-2-5- تئوري ميدان فشاري اصلاح شده (MCFT)

تئوري ميدان فشاري اصلاح شده يكي از روش هاي مطرح براي تعيين سهم برشي اعضاء بتن آرمه ميباشد كه در سال **1986** توسط وكچيو و كالينز⁶⁶ معرفي شد[**33**]. با افزايش روزافزون استفاده از تكنيك مقاوم سازي برشي اعضاء بتن آرمه با FRP، مطالعات متعددي شامل تعيين سهمFRP با استفاده از روشMCFT, در سال هاي اخير انجام شده است. مالك و سعادت منش (**1998)** از اين روش براي محاسبه سهم صفحات FRP با تغيير زاويه ترك استفاده كردند. آنها در مدل خود فرض نمودند كه توزيع كرنش در FRP يكنواخت است و هيچ گونه لغزشي بين FRP و بتن وجود ندارد. ليز و همكار ان (2002)⁶⁷ نيز توسعه كرنش در صفحات FRP را با استفاده از روش MCFT بر پايه فرضيات مشابه تحليل نمودند. به طور كلي در اين تئوري فرض بر اين است كه زاويه ترك خوردگي بتن متغير بوده و چسبندگي كامل بين بتن و ورقه FRP برقرار است[**3**].

3-2-5- تئوري اصطكاك برشي

در آييننامه هايي نظير ACI و AASHTO روش اصطكاك برشي، هدايت انتقال برش را در امتداد يك صفحه معين مانند سطح بين يك ترك موجود، سطح مشترك بين مواد ناهمسان يا بين سطوح بتن كه در فواصل زماني متفاوت ريخته شدهاند, بررسي ميكند[**31**]. شكل(**5-4)** يك بلوك بتني ترك خورده با تقويت هاي طولي متقاطع با ترك را نشان ميدهد. نيروي برشي v موازي ترك عمل نموده و باعث لغزش نسبي دو نيمه ميشود. به علت زبري سطح ترك، لغزش باعث جدايي دو نيمه شده كه اين جداشدگي، كشش موجود در تقويت هاي داخلي را افزايش ميدهد. برايند نيروي برشي، مواز ي برشي، فساري برابر

^{\-}Modified Compression Field Theory

r-Vecchio and collions (1986)

r-lees et al (2002)



شكل5-4- يك بلوك بتني ترك خورده[31]

در اين روش مبناي تعيين نيروي برشي ايجاد شده، رابطه زير ميباشد[**37**].

$$V=\mu.N$$
 که در آن, μ ضريب اصطکاک و N_{r} نيروي نرمال است.
که در آن, μ ضريب اصطکاک و N_{r} نيروي نرمال است.
براي تعيين سهم FRP در تقويت برشي، V_{FRP} ، از دياگرام آزاد تير بتني ترک خورده شکل (5-3)
استفاده ميگردد. همان طور که مشاهده ميشود، نيروي چسبندگي N_{FRP} , عمود بر ترک است. اين
نيرو نميتواند به طور مستقيم در برابر نيروي برشي مقاومت نمايد زيرا توسط نيروي فشاري بين
سطوح ترک متعادل ميشود. در اينجا FRP همان نقش تقويت هاي برشي شکل (5-4) را در ايجاد
سطوح ترک متعادل ميشود. در اينجا ميکند, بنابراين با استفاده از تئوري اصطکاک برشي
رابطه زير را براي تعيين مقاومت برشي تامين شده توسط FRP در نظر ميگيرند[31].
 $\Delta V_{i} = \mu.N_{FRP}$

FRP روابط طراحي موجود در تخمين ظرفيت برشي

در اكثر آيين نامه ها و روابط طراحي سهم برشي بتن، فو لاد و FRP به صورت مجزا در قالب رابطه زير ارزيابي مي شوند.

 $V_n = V_c + V_s + V_{FRP} \tag{(7-3)}$

که در آن

_V و _V را ميتوان مطابق روابط ارائه شده در هر يک از آييننامههاي موجود محاسبه نمود. بنابراين اختلاف عمده بين طرحهاي موجود در ارزيابي سهم FRP در تقويت برشي است. که در ادامه برخي از روابط ارائه شده به اجمال تشريح ميشود.

1-3-5- رابطه ارائه شده توسط چالال و همکاران68 (1998)

چالال و همكاران[**35**] رابطه زير را براي تعيين مقاومت برشي تامين شده توسط FRP ارائه نمودند:

$$V_{FRP} = \phi_{FRP} A_{FRP} f_{FRP} \frac{(\sin\beta + \cos\beta)d}{S_{FRP}}$$
(*-2)

كه در آن f_{FRP} , مقاومت كششيFRP, *ه. \phi_{FRP} = 0.8*, ضريب كاهش مقاومت FRP, F_{FRP} , مساحت مقطع عرضي جفت نوار FRP, β , زاويه امتداد الياف نسبت به محور افق در جهت عقرب**ه اي** D

فرضيه اساسي در ارائه اين روش اين است كه سهم FRP براي ظرفيت برشي مشابه سهم ميلگردهاي برشي داخلي است و اين بدان معناست كه همه نوار هايFRP قطع شده توسط ترك برشي در لحظه گسيختگي تير, به مقاومت كششي نهايي خود ميرسند, مگر اينكه طول چسبندگي آنها ناكافي باشد. اين فرضيه بسيار خوش بينانه است و نقطه ضعف اساسي اين مدل به شمار ميآيد[**35**].

2-3-5- مدل ارائه شده توسط تريانتافيلو 69(1998)

(0-0)

تريانتافيلو[**36**] اظهار داشت كه هيچگاه نميتوان به طور دقيق سهم FRP در ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه مقاومشده را پيشبيني نمود, چرا كه مكانيزم شكست و عوامل مختلف متعددي در تعيين سهم FRP مؤثر هستند. او در نهايت از يک روش عددي كه منجر به معادله طراحي زير در قالب آييننامه اروپا شد, استفاده نمود.

$$V_{FRP} = \frac{\partial/9}{\gamma_{FRP}} \rho_{FRP} E_{FRP} \varepsilon_{FRP,e} b_w d(1 + \cot \beta) \sin \beta$$

در معادله فوق, _{EFRP}, مدول يانگ FRP, _{FRP}, نسبت سطح _{bw}, FRP, _{FRP}, عرض تير بتنآرمه و _{γFRP}, فاکتور ضريب ايمني جزيي براي FRP در کشش تک محوره است که در حدود **1/15, 1/20** و 1/25 به ترتيب براي الياف کربن، آرميد و شيشه در نظر گرفته ميشود.

كرنش مؤثر FRP, كرنش در مرحله شكست است كه با استفاده از نتايج آزمايشگاهي به شكل زير قابل محاسبه مى باشد [**36**].

 $\varepsilon_{FRP,e} = 0.0119 - 0.0205\rho_{FRP}E_{FRP} + 0.0104(\rho_{FRP}E_{FRP})^2$

$$0 \le (\rho_{FRP} E_{FRP}) \le 1$$
 (6-5)

$$\varepsilon_{FRP,e} = -0.00065 \rho_{FRP} E_{FRP} + 0.0024s \qquad \rho_{FRP} E_{FRP} > 1$$
 (7-5)

v-Chaallal et al(1998)

v-Triantafillou(1998)

ر ابطه بالا بر اي محاسبه سهم نو ار هاي FRP در تعيين ظرفيت برشي نيز به كار ميرود. ضعف عمده اين مدل در اين است كه تفاوت خاصي بر اي الگو هاي مختلف مقاومسازي نظير الگوي دورپيچ كامل و استفاده از FRP روي دو وجه جانبي تير و همچنين حالتهاي شكست متفاوت, قائل نشدهاست.

3-3-5- مدل خاليفا و همكاران⁷⁰ (1998)

خاليفا و همكاران[**37**] با در نظر گرفتن سطح كرنش در گسيختگي به عنوان كرنش مؤثر _{۶۶_{fe}, رابطه تريانتافيلو **(1998)** در تعيين سهم تقويتهاي FRP در ظرفيت برشي را به صورت زير بيان نمودند.}

$$V_{\text{FRP}} = \rho_{FRP} \mathcal{E}_{FRP} \mathcal{E}_{FRP,e} b_w \theta.9 d(1 + \cot\beta) \sin\beta$$
(A-2)

در رابطه فوق,
$$b_w$$
 عرض مقطع عرضي تير، d فاصله سطح فشاري تير تا مرکز آرماتور هاي f_w برشي و ρ_{FRP} , نسبت سطح FRP, ميباشد. که با استفاده از رابطه زير تعيين ميشود[**37**].
 $\rho_{FRP} = (\frac{2t_{FRP}}{b_w})(\frac{W_{FRP}}{S_{FRP}})$

پار امتر هاي استفاده شده در اين رابطه عبارتند از:
$$t_{FRP}$$
, ضخامت صفحه FRP روي يک وجه
تير (mm)، W_{FRP} , عرض نوار هاي FRP، FRP، فاصله نوار هاي FRP.
اين معادله را در فرمت آيين نامه ACI به صورت زير ميتوان نوشت[**37**].
 $V_{FRP} = \frac{A_{FRP}f_{FRP,e}(\sin\beta + \cos\beta)d_{FRP}}{S_{FRP}}$, $f_{FRP,e} = \varepsilon_{FRP,e}E_{FRP}$

$$R = \frac{\varepsilon_{FRP,e}}{\varepsilon_{FRP,u}} = \frac{f_{FRP,e}}{f_{FRP,u}}$$
با توجه به نتایج آزمایشگاهي, چندجملهاي زیر براي R استخراج شد.

$$R=0.5622(\rho_F E_F)^2 - 1.2188(\rho_F E_F) + 0.778 \le 0.5$$

اطلاعات آزمايشي استفاده شده در ارائه مدل كرنش مؤثر خاليفا شامل دو نوع سيستم مختلف FRP (CFRP;AFRP) ، سه الكوي مقاوم سازي (دور پيچ كامل، پوشش U شكل و پوشش دو وجهي) و

r-Khalifa et al(1998)
تقويت هاي ممتد و نواري با زاويه الياف °45 و °90 ميباشد. اگرچه مطابق شكل (5-5) همه نتايج داراي رفتار يكساني هستند, اما بررسي اين روش مستلزم برآورد نتايج آزمايشي بيشتري است. به طور مثال تنها 4 نمونه آزمايشي مقاوم شده با AFRP در نظر گرفته شد. كه اين تعداد, در دادن حكم قطعي در استفاده از معادله فوق براي محRP بسيار كم است. بنابراين استفاده از اين روش تنها براي قطعي در استفاده از معادله فوق براي محم محدود شده در حاليكه راست. بنابراين استفاده از اين روش تنها براي در ادون حكم قطعي در استفاده از معادله فوق براي محم محدود شده در حاليكه رابط ازمايشي به اعضاء مقاوم شده با FRP بسيار كم است. بنابراين استفاده از اين روش تنها براي نمونه هاي مقاوم شده با FRP محدود شده در حاليكه رابطه ارائه شده براي همه زواياي موجود داراي الياف با زاويه °45 و °00 محدود شده در حاليكه رابطه ارائه شده براي همه زواياي موجود پيشنهاد شده است. با اشاره به اين مطلب كه مدل كرنش مؤثر فقط زماني كه گسيختگي از نوع پارگي FRP است, كاربرد دارد. لذا خاليفا و همكار انش[37] مدل ديگري را با در نظر گرفتن مشخصه هاي است, كاربرد دارد. لذا خاليفا و همكار انش[37] مدل ديگري را با در نظر گرفتن مشخصه هاي معربر محم ممه زواياي موجود مدوم بي اين موجود ترماي مدوم مدل كرنش مؤثر فقط زماني كه گسيختگي از نوع پارگي بي به است, كاربرد دارد. لذا خاليفا و همكار انش[37] مدل ديگري را با در نظر گرفتن مشخصه هاي مربوط به چسبندگي بتن و FRP مبتني بر مدل مقاومت چسبندگي مائيدا و همكار ان[38] ¹⁷ ارائه مربوط به چسبندگي بي در درد.



شكل**5-5-** تغييرات R نسبت به سختي محوري[**37**]

مائيدا و همكار انش**(1997)** مكانيزم چسبندگي صفحات FRP با بتن را به وسيله آزمايش كشش ساده مورد بررسي قرار دادند. آنها بر اساس نتايج آزمايشگاهي، مفاهيم طول مؤثر چسبندگي و مقامت چسبندگي متوسط را معرفي نموده و معادلاتي را جهت پيشبيني رفتار چسبندگي پيشنهاد كردند. روش طراحي خاليفا بر مبناي مكانيزم چسبندگي, شامل تنش متوسط چسبندگي, طول مؤثر چسبندگي، _{Le} و عرض مؤثر چسبندگي،_{Wfe} است و با رابطه زير تعيين ميشود[**37**].

$$V_{FRP} = \frac{2L_{e}w_{FRP}\tau_{bu}w_{FRP,e}}{S_{FRP}}$$
(14-2)

v-Maeda et al(1997)

$$\tau_{bu} = K \left(\frac{f_c}{42}\right)^{2/3} E_{\text{FRP}} t_{\text{FRP}}$$
(12-2)

$$L_e = e^{6.134 - 0.58ln(t_{FRP}E_{FRP})} \tag{19-2}$$

$$w_{FRP,e} = d_{FRP}$$
 براي صفحات استفاده شده به صورت دور پيچ كامل
 $w_{FRP,e} = d_{FRP} - L_e$ براي صفحات استفاده شده به صورت پوشش U شكل
 $w_{FRP,e} = d_{FRP} - L_e$ براي صفحات استفاده شده بر دو وجه جانبي تير
براي صفحات نصب شده بر دو وجه جانبي تير

انجمن بتن انگلستان در آبيننامه طراحي خود براي مقاومسازي سازههاي بتني با FRP از رابطه خاليفا و همكاران استفاده نمود و توصيه كرد كه كرنش ماكزيمم در FRP نبايد از 0/004 تجاوز نمايد[**37**].



شكل5-6- مقايسه روش طراحي پيشنهاد شده توسط خاليفا و همكار انش با نتايج أزمايشگاهي[37]

2-3-5 مدل تري انتافيلو و آنتونو پولوس⁷² (2000)

تريانتافيلو و آنتونوپولوس[**39**] بر اساس نتايج آزمايشگاهي طيف وسيعي از كرنشهاي مؤثر مختلف را براي انواع مختلف FRP ارائه نمودند و ضرايب متفاوتي براي دورپيچ كامل CFRP و ديگر

v-Triantafillou and Antonopoulos(2000)

نمونه هاي مقاومسازي پيشنهاد كردند. اما تفاوتي بين پوشش دو وجهي و U شكل قائل نشدند. فدراسيون بين المللي سازه هاي بتني(fib) با فرض اعمال ضريب 0/8 براي طراحي، استفاده ا زروابط كرنش مؤثر ارائه شده توسط تري*از ته افتيال و قوز تهوز وي ول وس ر ا* توصيه **ييك نهد. مط ابق** با اين مدل[39]:

$$V_{n}+V_{c}+V_{s}+V_{f} \leq V_{R2} = 0.45\nu_{co}f_{c}bd$$

$$(^{\Lambda-\Delta})$$

$$V_{a} = \frac{A_{f}E_{f}\varepsilon_{fc}d_{f}}{(^{\Lambda-\Delta})}$$

$$V_{f} = \frac{A_{f}E_{f}e_{fe}d_{f}}{S_{f}}$$

$$\Box_{\Box\Box} = 0.7 - \Box_{\Box}'/200 > 0.5 \tag{(Y-2)}$$

كرنش مؤثر در اين مدل به صورت زير تعريف مي شود [**39**].



(21-5)

در رابطه فوق:

$$\rho_{\rm f} = \frac{\Box_{\Box}}{{}_{\rm bS_{\rm f}}} \tag{(Y-\Delta)}$$

5-3-5 مدل چن و تنگ⁷³ (2003)

چن وتنگ[**40**] به منظور بهبود نارسايي مدلهاي طراحي ارائه شده و با توجه به لزوم ارائه مدل طراحي مناسب، به ارزيابي نتايج آزمايشهاي موجود پرداختند. به علت تفاوت آشكار بين دو مد گسيختگي ناشي از پاره شدن و جدا شدن FRP، شيوه طراحي و برخورد با هر كدام متفاوت است. لذا آنها در مدل خود اين اختلاف را لحاظ نموده و به طور جداگانه روابطي براي تخمين سهم تقويت برشي FRP، ارائه نمودند كه به تفضيل در زير تشريح ميشوند.

FRP مدل مقاومت برشي براي شكست برشي ناشي از پاره شدن

v-Chen and Teng(2003)

همان طور كه پيش از اين نيز بيان شد. گسيختگي همه تير هاي مقاومشده با پوشش دورپيچ و برخي از تير هاي مقاومشده با پوشش U شكل در برش, تحت اثر پاره شدن FRP رخ ميدهد. لذا مدل مقاومت برشي ارائه شده توسط چن و تنگ[**40**] در اين بخش, براي اين دو نوع تير كاربردي است. در صورت استفاده از مهار هاي مكانيكي مناسب, از اين مدل همچنين ميتوان براي تعيين سهم برشي FRP , در تير هاي مقاومشده با پوشش دو وجهي نيز استفاده نمود.

FRP در امتدا ترک برشی FRP در امتدا ترک برشی

نتايج مطالعات نشان ميدهد كه توزيع كرنش در FRP كاملاً غير يكنواخت است. اين پديده ميتواند به اين حقيقت كه عرض ترك برشي در امتداد طولش متغير است, نسبت داده شود. چون به واسطه رفتار الاستيك و خطيFRP، كرنش در آن كاملاً به عرض ترك وابسته است.

توزيع غير يكنواخت كرنش اختلاف رفتاري بنيادي بين فولاد و تقويتهاي برشي FRP را خاطر نشان ميكند. فولاد در نقطه تسليم خود ميتواند تغيير شكلهاي پلاستيك بزرگي را تحمل نمايد، لذا منطقي است فرض شود كه تقويتهاي برشي فولادي قطع شده توسط ترك برشي در طراحي به مقاومت تسليم خود ميرسند. غير يكنواخت بودن توزيع كرنش براي تقويتهاي FRP، بدين معناست كه فرايند گسيختگي زماني آغاز ميشود كه اولين نقطه داراي بيشترين تنش به حداكثر مقاومت برشي خود برسد، سپس گسيختگي قسمتهاي مجاور در امتداد ترك برشي تا فرو ريختن كامل تير پيش ميرود. بنابراين در نظر گرفتن اين فرضيه كه FRP قطع شده توسط ترك برشي به مقاومت برشي نهايي خود ميرسد. فرضيه نادرست و غير محافظهكار انهايست. لذا چن و تنگ[3] تنش مؤثر در Saft مقاومت برشي از مقاومت و غير محافظهكار انهايست. لذا چن و تنگ[4] تش مؤثر در Saft مقاومت در نظر گرفتن اين فرضيه كه FRP قطع شده توسط ترك برشي به مقاومت برشي دهايي خود ميرسد. فرضيه نادرست و خير محافظهكار انهايست. لذا چن و تنگ[7] تنش مؤثر در Saft مقاومت جرسي را در مرحله نهايي مطابق رابطه زير تنها به صورت كسري از مقاومت

$$f_{\rm FRP} = D_{\rm FRP} f_{\rm FRP} \tag{(17-2)}$$

$$\bar{\varepsilon}_{z} = \begin{cases} \frac{l-C\bar{Z}}{l-C}\bar{Z} & 0 \le C \le \frac{l}{\varepsilon} \\ 4C\bar{Z}(l-C\bar{Z}) & \frac{l}{\varepsilon} \le C \le l \end{cases}$$

$$(\Upsilon \not - \Delta)$$

که در آن, $z = z = \overline{z}$ مشخصات قائم نر مال و $Z_b = 0.9d$, مختصات لبه پابيني FRP مؤثر که از مرکز $z_{z_b} = z_{z_b}$ سطح ميلگردهاي خمشي فو لادي محاسبه ميشود(شکل(**6-8))**[**40**].



شکل **FRP** توزیع کرنش نرمال در FRP در امتداد ترک بحراني[**40**]



شكل**5-8-** نمونه مقاوم شده با FRP [40]

عامل توزيع كرنش، D_{FRP}، به عنوان نسبت كرنش متوسط به كرنش ماكزيمم مطابق رابطه (2**4-5)** تعريف مي شود[**40**].

 $D_{FRP} = \int_{Z_f}^{Z_b} \frac{\overline{E}_z dz}{h_{FRP,e} \overline{e}_{z,max}} \qquad \qquad h_{FRP,e} = Z_b - Z_t \qquad (\Upsilon \Delta - \Delta)$

با انتگر الگیری از معادله (**23-5)** رابطه زیر برای عامل توزیع کرنش، D_{ERP}، به دست می آید [**40**].

$$\Box_{\Box\Box\Box} = \begin{cases} \frac{l+\Box}{2(l-\Box)} - \frac{\Box}{3-(l-\Box)} \left(l+\Box+\Box^{2} \right) & 0 \le \Box \le \frac{l}{2} \\ 2\Box \left(l+\Box \right) - \frac{4}{3} \Box^{2} \left(l+\Box+\Box^{2} \right) & \frac{l}{2} < \Box \le I \ \Box\Box\Box \le \frac{1}{2\Box} \\ \frac{3(l+\Box)-2\Box \left(l+\Box+\Box^{2} \right)}{6\Box \left(l-\Box \right)} & \frac{l}{2} < \Box \le I \ \Box\Box\Box > \frac{l}{2\Box} \end{cases}$$
(Y?- Δ)

که در آن $\frac{Z_t}{Z_b} = 3$ نسبت مختصات لبه بالايي به لبه پاييني FRP مؤثر ميباشد. براي يک تير با مختصات معين و بر اساس اين فرض که نوک ترک، به اندازه 0.1d از لبه فشاري تير فاصله دارد، لبه فوقاني FRP مؤثر به شکل زير خواهد بود[**40**]. لبه فوقاني FRP مؤثر به شکل زير خواهد بود[**40**]. (۲۷-۵)

مطابق معادله **(23-5)** شكل توزيع كرنش به ضريب c بستگي دارد. وقتي $c_{=1}$ ، توزيع كرنش به صورت سهموي با مقدار ماكزيمم $Z = \frac{Z_b}{2}$ است و اگر $c_{=0}$ باشد, توزيع كرنش خطي ميشود.

شكل (7-5) توزيع كرنش هاي مختلف را بر اساس مقادير متفاوت C نشان ميدهد. مطابق شكل (9-5) عامل توزيع كرنش، D_{FRP}، از مقدار 0/5 براي C=0/75 براي O/75 براي C=0/75 براي C=0/75 تمام ارتفاع تير توسط FRP پوشانده شده، متغير ميباشد.



شکل D_{FRP} اثر ضریب توزیع کرنش C بر D_{FRP} اثر

FRP در ظرفيت برشي FRP در ظرفيت برشي

چن و تنگ[**40**] با در نظر گرفتن ترک بحراني، تحت زاويه **6** نسبت به جهت طولي تير (شکل(5-8))، مقاومت برشي تامين شده توسط FRP را به صورت رابطه زير بيان نمودند.

$$V_{FRP} = 2F_{FRP,e} t_{FRP} w_{FRP} \frac{h_{FRP,e}(\cot\theta + \cot\beta)\sin\beta}{S_{FRP}}$$
(YA-2)

(٢٩-۵)

$$S_{FRP} = \frac{W_{FRP}}{\sin\beta}$$



شكل 5-10- رابطه بين w_{FRP} و S_{FRP} براي صفحات ممتد [40]

$$V_{FRP} = \frac{F_{FRP,ed}}{\gamma_{FRP}} 2t_{FRP} w_{FRP} \frac{h_{FRP,e}(\sin\beta + \cos\beta)}{S_{FRP}}$$
($\Upsilon \cdot \delta$)

در رابطه فوق,
$$\gamma_{FRP}$$
 ضريب ايمني است كه برابر 1/25 پيشنهاد شد.
تنش مؤثر طراحي $F_{FRP,e}$, مطابق رابطه زير تعريف مي شود [40]:

$$F_{FRP,e} = D_{FRP} \gamma_{FRP} \tag{(7.2)}$$

$$\gamma_{FRP,max} = \begin{cases} 0.8 \ F_{FRP} & IF \ \frac{F_{FRP}}{E_{FRP}} & E_{max} \\ 0.8 \varepsilon_{max} \ E_{FRP} & IF \ \frac{F_{FRP}}{E_{FRP}} > \varepsilon_{max} \end{cases}$$

$$(^{\text{rt-0}})$$

$$(^{\text{r$$

FRP مدل تقويت برشى براي شكست ناشى از جدا شدن

چن و تنگ[**41**] با فرض اينكه تنش متوسط(يا مؤثر) در FRP متقاطع با ترك برشي بحراني(شكل(**5-11)),** در مرحله حد نهايي برابر *F_{FRP,e} است سهم نوار هاي FRP در ظر*فيت برشي را براي مد شكست ناشي از جدا شدن FRP به صورت معادله زير بيان كردند[**41].**

$$V_{\rm FRP} = 2f_{\rm FRP,e}t_{\rm FRP}W_{\rm FRP}\frac{h_{\rm FRP,e}(\cot\theta + \cot\beta)}{S_{\rm FRP}}$$
(°°-Δ)



شكل **11-5-** نمونه مقاوم شده با FRP به صورت پوشش دو وجهي [**41**]

با در نظر گرفتن غیر یکنواخت بودن تنشها در FRP متقاطع با ترک برشي بحراني، تنش متوسط (یا مؤثر) در FRP در حد نهايي, $F_{FRP,e}$ به صورت زیر تعریف شد[**41**]. h_{FRP,e} = D_{FRP} $\sigma_{FRP,max}$

که در آن, _{σFRP,max}, ماکزيمم تنش در FRP و _{DFR}, ضريب توزيع تنش ميباشد. در گسيختگي با جدا شدن FRP، تنش ماکزيمم FRP در محلي که FRP بيشترين طول چسبندگي را دارد, ايجاد ميشود. در اين حالت بيشترين تنش FRP که توسط مقاومت نهايي چسبندگي محدود ميشود, از رابطه زير بدست ميآيد:

$$\sigma_{FRP,max} = min \begin{cases} F_{FRP} \\ 0.427\beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{FRP}\sqrt{fc}}{T_{FRP}}} \end{cases}$$
(72-2)

که در آن β_w منعکس کننده اثر نسبت عرض تیر به عرض FRP و β_L نیز در بر گیرنده اثر طول چسبندگي ميباشد که توسط روابط زير تعيين ميشوند[**41**].

$$\beta_{W} = \sqrt{\frac{2 - W_{FRP}/(S_{FRP\sin\beta})}{1 + W_{FRP}/(S_{FRP\sin\beta})}} \tag{(7.5.4)}$$

$$\beta_L = \begin{cases} l & \lambda \ge l \\ \sin\frac{\pi\lambda}{2} & \lambda < l \end{cases}$$

$$\beta_L = \begin{cases} l & \lambda \ge l \\ \sin\frac{\pi\lambda}{2} & \lambda < l \end{cases}$$

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda \ge l \\ \lambda \le l \end{cases}$$

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda \ge l \\ \lambda \le l \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e} \tag{TA-2}$$

در رابطه فوق _{Lmax} و _{Le} به ترتيب طول چسبندگي ماکزيمم و طول چسبندگي مؤثر ميباشند که توسط رابطه فوق (Lmax و (39-5) و (40-5) تر عيمين ميشدود.

$$L_{e} = \sqrt{\frac{L_{FRP}L_{FRP}}{\int_{f'}^{f'}}}$$

$$= \sqrt{\frac{L_{FRP}L_{FRP}}{\int_{f'}^{Z_{b}} \sigma_{FRP,z} dz}}$$

$$= \sqrt{\frac{L_{T}}{Z_{t}}} = \sqrt{\frac{L_{T}}{2}}$$

 $D_{FRP} = \frac{\int_{Z_t}^{Z_b} \sigma_{FRP,z} dz}{h_{FRP,e} \sigma_{FRP,max}}$ (*1-2)

که در آن $\sigma_{FRP,max}$ تنش FRP در عمق z ميباشد. در ارائه رابطه فوق فرض شده است که نوارهاي مجزاي $\sigma_{FRP,max}$ ميتوانند همانند صفحات پيوسته FRP رفتار نمايند. با در نظر گرفتن اين فرض،براي يک تير مقاوم شده با پوشش U شکل، تنش در قسمتي از FRP متقاطع با ترک برشي بحراني, در عمق z, در شکست را ميتوان از معادله (**36-5**) با جايگزيني $L_z = \frac{z}{\sin\beta}$ در معادله (**36-5**) به دست آورد[**41**].

$$\sigma_{FRP,Z} = \min \begin{cases} f_{FRP} \\ 0.427\beta_w \beta_{Lz} \sqrt{\frac{E_{FRP} \sqrt{f_c}}{t_{FRP}}} \end{cases}$$
(*7-2)

$$\beta_{Lz} = \begin{cases} 1 & \lambda_z \ge 1 \\ \sin \frac{\pi \lambda_z}{2} & \lambda_z < I \end{cases} ; \quad \lambda_z = \frac{L_z}{L_e} = \frac{Z}{L_e \sin \beta}$$
 (47-3)

و در نهایت عامل توزیع تنش، D_{FR}، را میتوان با جایگزین کردن معادلات **(34-5)** و **(39-5)** در معادله **(38-5)** به صورت زیر تعیین نمود[**41**].

$$D_{\text{FRP}} = \begin{cases} \frac{Z}{\pi \lambda} \frac{1 - \cos\frac{\pi}{Z} \lambda}{\sin\frac{\pi}{Z} \lambda} & \lambda \le 1\\ 1 - \frac{\pi - Z}{\pi \lambda} & \lambda > 1 \end{cases}$$
(**- Δ)

FRP -3-5-3-5 فاصله مجاز نوارهاي

معادلات طراحي ارائه شده توسط چن و تنگ, با فرض اينكه نوارهاي مجزاي FRP مانند صفحات ممتد معادل، رفتار ميكنند، به دست آمدهاند. براي اينكه اين معادلسازي به نتايج درستي بينجامد لازم است تعداد نوارهايي كه توسط ترك برشي قطع ميشوند، كافي باشد. براي اين منظور در صورت استفاده از پوششهاي U شكلFRP, مطابق شكل(**5-12**الف) اگر انتهاي نوار, در شروع دهانه ترك خوردگي كه در واقع عريضترين قسمت دهانه ترك است، قرار بگيرد، حداكثر استفاده از وجود نوار به عمل ميآيد. اگر وضعيت نوار FRP و ترك برشي به صورت شكل(**5-12** تاثيري در ظرفيت برشي مقطع نخواهد داشت, چرا كه در اين حالت قبل از اينكه FRP وارد عمل شود, به علت باز شدن دهانه ترك، ممكن است شكست تير رخ دهد.

در حالت مقاومسازي با صفحات جانبي، مؤثرترين حالت مطابق شكل**(5-12**ب), زماني است كه ترک قطري از وسط نوار عبور کند. زيرا در اين حالت طول چسبندگي FRP بيشترين مقدار را خواهد داشت. اگر نوارهاي جانبي مطابق شكل**(5-12**د) بر روي تير نصب شوند، نوار قرار گرفته در انتهاي ترک به کرنش لازم خود نميرسد و نوار نصب شده در عريضترين ناحيه ترک طول چسبندگي لازم را نخواهد داشت. لذا در اين حالت FRP تاثيري در مقاومسازي ندارد[**40**].



شكلFRP در كارآيي آن [40] در كارآيي آن

(الف) موقعيت بيشترين تأثير براي حالتهاي پوشش U شكل و دورپيچ كامل, (ب) موقعيت بيشترين تأثير براي حالت نصب FRP روي دو وجه جانبي, (ج) موقعيت كمترين تأثير براي حالتهاي پوشش U شكل و دورپيچ كامل, (د) موقعيت كمترين تأثير براي حالت نصب روي دو وجه جانبي

به همين منظور چن و تنگ فاصله مجاز نوار هاي FRP را به صورت رابطه زير ارائه نمودند.

$$S_{FRP} \leq S_{FRP;max} = \frac{\Box_{FRP;e}(\sin\beta + \cos\beta)}{2}$$
پوشش U شکل (۴۵-۵)

$$S_{FRP} - \frac{W_{FRP}}{\sin \beta}$$

$$\leq lesser \ of \ \frac{\Box_{FRP,e}(1 + \cot \beta)}{2} \ and \ 300 \ mm \ int (++-\delta)$$

$$h_{frame} = \int_{FRP,e}^{W_{frame}} FRP \ strip$$

5-3-5- مدل ماتهيز و تريانتافيلو⁷⁴ (2001)

ماتهيز و تريانتافيلو [**42**] اصلاحيه ي برمدل تري انتافيلو و آنتونو پولوس **(2000)** انجام دادند و اثر نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر را در محاسبه كرنش مؤثر وارد نمودند. معادله كرنش مؤثر ارائه شده توسط آنها به صورت زير بيان مي شود [**42**].

$$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0.72\varepsilon_{\rm fu}e^{-0.0431}\Gamma_f & \text{FRP} \\ 0.56\varepsilon_{\rm fu}e^{-0.0455}\Gamma_f & \text{FRP} \\ 0.56\varepsilon_{\rm fu}e^{-0.0455}\Gamma_f & \text{Tr}_f \end{cases}$$
(۴۷-۵)

که در آن

$$\Gamma_f = \frac{E_f \rho_f}{f_c^2(a/d)} \tag{FA-\Delta}$$

5-3-5- مدل كولوتي و همكاران⁷⁵ (2004)

كولوتي و همكارانش مجموع تقويت برشي تامين شده در يك تير بتن آرمه مقاوم شده با FRP را به صورت رابطه زير بيان نمودند[**43].**

$$\psi = \psi_i + \psi_e \tag{(*9-2)}$$

آنها مقاومت برشي تامين شده توسط تقويتهاي برشي داخلي,
$$\psi_{ij}$$
 , را با رابطه زير تعريف نمودند.
 $\psi_i = \frac{A_{stf\,ty}}{bsf_c'}$

و سهم تقويت FRP در تامين مقاومت برشي, ψ_e به صورت زير معرفي شد [43].

$$\psi_e = \begin{cases} \frac{2w_f t_f}{bs_{ff_c}} f_{fe} & \text{ if } f_{fe} \\ \min\left(\frac{w_f d_f}{bs_f f_c} \tau_u; \frac{2w_f t_f}{bs_f f_c} f_{fe}\right) & \text{ if } U \end{cases}$$

$$(31-3)$$

در رابطههاي بالار f_{ty} و A_{st} به ترتيب مقاومت تسليم و سطح مقطع تقويتهاي عرضي b عرض $f_{fe} = f_{fe}$ بن تير s_{ff} فاصله نوارها از يكديگر $g_{fe} = g_{ff}$ فاصله نوارها از يكديگر v_{ff} و v_{ff} مقاومت مقاومت مقاومت موثر و v_{ff} مقاومت جسبندگي است كه با رابطه زير تعيين مي شود.

v - Matthys and Triantafillou(2001)

r - Colotti et al (2004)

ACI440 مدل ارائه شده در آییننامه ACI440

آيين نامه ACI رابطه زير را براي تعيين سهم برشي FRP, پيشنهاد مي نمايد [**1**].

$$V_{FRP} = \frac{A_{fu}f_{fe}(\sin\alpha + \cos\alpha)d_f}{S_f} \tag{\Delta T-\Delta}$$

که در آن

$$A_{fu} = 2nt_f W_f \tag{24-2}$$



شكل-14- تقويت ب رشع با FRP [1]

کرنش مؤثر، _{٤fe}، در FRP کمتر از کرنش نهايي, _{٤fu}, در نظر گرفته ميشود و به صورت زير محاسبه ميگردد[**1**].

ضريب كاهش پيوستگي، _{Kv}, تابعي از مقاومت بتن، نوع الگوي مورد استفاده در نصب FRP به تير و سختي ورق FRP است كه مطابق رابطه زير (در سيستم SI) تعريف ميشود.

$$K_{\rm v} = \frac{K_1 K_2 L_{\rm e}}{11900\varepsilon_{\rm fu}} \le 0.75 \tag{27.3}$$

در رابطه فوق, $_{L_e}$, طول چسبندگي مؤثر, $_{I_1}$ و $_{K_2}$ ، به ترتيب ضريب اصلاح مربوط به مقاومت بتن و الگوي نصب $_{FR}$, ميباشد كه مطابق روابط زير بيان مي شوند [**1**].

$$L_{e} = \frac{23300}{(nt_{f}E_{f})^{0.58}} \tag{\Delta V-\Delta}$$

$$K_1 = \left(\frac{f_c}{27}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{2A-\Delta}$$

$$K_{2=} \begin{cases} \frac{d_{f}-L_{e}}{d_{f}} & \text{in } U \text{ in } U \text{ in } U \\ \frac{d_{f}-L_{e}}{d_{f}} & \text{ ял } U \text{ ал } U \text{ ал$$

5-3-9- مدل ارائه شده در آييننامه طراحي و ضوابط اجرايي بهسازي ساختمان ايران در آييننامه طراحي ايران[**44**] سهم مصالح FRP از برش به صورت زير تعيين ميشود:

$$V_{\rm frp} = \frac{\Phi_{\rm FRP} E_{\rm FRP} \varepsilon_{\rm FRP} d_{\rm FRP} (\sin\beta + \cos\beta)}{S_{\rm FRP}} \tag{7.-2}$$

که در رابطه بالا داریم:

$$A_{FRP} = 2t_{FRP} w_{FRP}$$
(۶۱-۵)

كرنش مؤثر مصالح FRP، FRP، از طريق آزمايش و نيز به كار بستن معادلات **(5-45)** و **(48-5)** به دست ميآيد و در هر صورت كمترين مقدار به دست آمده از دو روش فوق در نظر گرفته ميشود. ليكن بايد كرنش مؤثر _{FRP,e} به مقدار 0/004 محدود شود، زيرا در محدوده بالاتر كرنش، قفل و بست سنگدانهاي بتن به دليل باز شدگي تركها از دست ميرود[44].

$$\varepsilon_{\text{FRP},e} = R \varepsilon_{\text{FRP},u} \tag{fY-\Delta}$$

مقدار R نسبت كرنش مؤثر به كرنش نهايي در نوارهاي FRP ميباشد كه به صورت زير تعيين ميشود:

$$R = 0.8\lambda_I \left[\frac{f_c^{2/3}}{\rho_{FRP} E_{FRP}} \right]^{\lambda_2} \tag{97-3}$$

 $\rho_{FRP} = \frac{2t_{FRP}W_{FRP}}{b_W s_{FRP}}$

در اين آييننامه به منظور در نظر گرفتن امکان جداشدگي ورقههاي FRP، کرنش مؤثر برابر کمترين سه مقدار زير در نظر گرفته ميشود[**44**].

حد کرنش مؤثر 2004 =
$$\epsilon_{FRP,e} = 0.004$$
 مقدار به دست آمده از رابطه (62-5)
مقدار ارائه شده در رابطه (62-5)
مقدار ارائه شده در رابطه (65-5)
در روابط (63-5) و (63-55) ضریب کاهش کرنش مؤثر برابر **8/0** در نظر گرفته شده است. در
رابطه (65-55), _{K1} شاخصي از مقاومت برشي بتن و _{K2} شاخصي برابر نحوه قرار گيري و آرايش
مصالح FRP ميباشد که به صورت زير تعريف ميشود[**44**].



شکل**5-15-** تقویت کھ ای بر شعب FRP, (الف) بر وجوہ جانبي تیر, (ب) پوشش U شکل[44]

$$K_{1} = \left[\frac{f_{c}}{27.65}\right]^{2/3}$$
(77-2)

$$K_2 = \frac{d_{FRP} - n_e L_e}{d_{FRP}}$$
(?\-\Delta)

در روابط فوق _{ne}, تعداد انتهاي آزاد نوار هاي FRP در يک سمت تير، به صورت نشان داده شده د رشکل () صيب الشد (د رصورتي که ت مها د ر د و وجه جان بي ت ير FRP داشته باشيم n_e = 2 و اگر نوار FRP به صورت U شکل باشد n_e = 1). هرگاه $K_2 \ge 0$ باشد، سيستم FRP در برش ناکار آمد است، مگر اينکه مهار FRP به روش مناسب تعيين گردد.

طول مهار هاي مؤثر، _{Le}، با استفاده از رابطه زير كه بر اساس داده هاي تجربي پيشنهاد شده است، محاسبه مي شود [**44**].

$$L_{e} = \frac{25350}{(t_{FRP} E_{FRP})^{0.58}} \tag{factor}$$

در مواردي كه تقويت برشي FRP به طور كامل تمام مقطع را دور پيچ كند، نيازي به محاسبه مقادير فوق نبوده و در اين حالت _{EFRPe} برابر **0/004** در نظر گرفته ميشود.

فصل ششم

تحليل عددي تيرهاي تقويت شده در برش با نرمافزار ANSYS

1-6- پیشگفتار

روش اجزاء محدود, روشي عددي است كه ميتوان آن را براي حل مسائل متعدد و متنوع مهندسي در حالات مختلف پايدار، خطي يا غير خطي مانند تحليل تنش، انتقال حرارت و جريان سيال به كار برد. اين روش كه ريشههاي آن به سالهاي اولية 1900 ميلادي بر ميگردد، عملاً در دهة 60 ميلادي به صورت نظام يافته، مدون و وارد مباحث مهندسي به خصوص مهندسي مكانيك و عمران شد و در دهة پاياني هزاره دوم به طور شگفت آوري در مراكز علمي و صنعتي جهان رسوخ نمود.

بدون شك روش اجزاء محدود, انقلابي در صنعت جهان و نحوة نگرش به تحليل و طراحي به وجود آورد. حل مسائلي كه توسط روش معمول تحليلي غير ممكن مينمود، قابليت مدل سازي فرآيندهاي واقعي صنعتي با كمترين سادمسازيها، توانمندي روش در ارائه نتايج قابل اطمينان، كاهش هزينههاي سنگين تستهاي عملي در فرآيندهاي طراحي، سرعت بالاي روش در حل مسائل و بالاخره افزايش قابليت اطمينان و ايمني در طراحي باعث گرديد تا اين روش به عنوان جزء لاينفك پيشرفت صنعتي درآيد. نرمافزار هاي تجاري اجزاء محدود با هدف پاسخ به نيازمنديهاي علمي و صنعتي، طراحي و به بازار ارائه گرديدند. تعداد و تنوع اين نرمافزار ها امروزه به حدي رسيده كه كاربر نميتواند به راحتي يكي را انتخاب كند. گرچه قابليتها و توانمندي هاي اين نرمافزار ها متفاوت است، اما در

در ميان نرمافزار هاي عمومي اجزاء محدود، نرمافزار هاي معتبري چون NASTRAN, ABAQUS و ANSYS به چشم ميخورد كه داراي قابليتهاي بالايي ميباشند. نرمافزار ANSYS كه توسط جمعي دانشگاهي در شركت Swanson به عنوان يكي از پيشگامان نرمافزار هاي اجزاء محدود طراحي شد, اولين بار در سال **1971** در اختيار عموم قرار گرفت و با قدمتي حدود **33** سال تكامل قابل توجهي يافت. اين نرمافزار با بيش از يك صد هزار خط كد كامپيوتر, قابليت تحليل مسائل مختلف در زمينههايي مانند هوافضا، خودرو، هستهاي، نيروگاهي و الكترونيك را دارا ميباشد.

به طور كلي براي حل مسائل فيزيكي سه روش موجود است[45]:

- 1- روش تحليلي دقيق (Exact solution)
- 2- روش عددي (Numerical solution)

(Experimental Method) دوش تجربي 3

در حل دقيق همانطور كه از نام آن مشخص است، به محاسبه دقيق پارامتري معادلات ديفرانسيل حاكم بر ميدانهاي فيزيكي همچون ميدان حرارتي، ميدان تنش، ميدان الكتريكي و ... ميپردازند. در حاليكه در روش دوم به حل تقريبي و عددي اين مسائل پرداخته ميشود. روش تجربي يا آزمايشگاهي نيز با توجه به اينكه مبتني و برگرفته از خود واقعيت ميباشد, روشي مناسب محسوب ميگردد. در اين ميان روش حل عددي كه اجزاء محدود زير مجموعه آن ميباشد، جزء يكي از پركارترين روشهاي مورد استفاده در حل مسائل مهندسي است. در روش اجزاء محدود غالباً مسائل فيزيكي به كمك معادلات ديفر انسيل حاكم بر سيستم و يا به كمك كمينه نمودن انرژي پتانيسل حل ميشوند. روش كار بدين صورت است كه كل مدل هندسي به اجزاء ريزتري به نام المان, تقسيم ميشود. هر المان خود داراي گرههايي است كه مقادير ورودي(بارگذاري و شرايط مرزي) و خروجي(نتايج) به آنها اختصاص داده ميشود[45]. به طور كلي ميتوان گفت حل عددي اجزاي محدود بر اركان زير استوار است[46]: 1- گسستهسازي و تفكيك يك عضو يا كل سازه به اجزاي كوچكتر 2- بدست آوردن معادلات حاكم بر يك جزء 4- اعمال شرايط مرزي وقيود تكيهگاهي 4- اعمال شرايط مرزي وقيود تكيهگاهي 6- حل دستگاه معادلات سيستم و بدست آوردن متغير مجهول 6- حل دستگاه معادلات بيستم و بدست آوردن متغير مجهول 6- من دستگاه معادلات به ستم و بدست آوردن متغير مجهول

مربوط به تير هاي بتنآرمه, به دليل رفتار پيچيده بتن امري بسيار مشكل ميباشد. در سالهاي اخير محققان تلاشهاي دامنهداري جهت شبيهسازي رفتار تيرهاي بتني مقاوم شده با سيستمهاي FRP با استفاده از روشهاي المان محدود انجام دادند.

آردوني و همكاران**[47]** رفتار و مكانيزم شكست تير بتني مقاومشده با FRP را با استفاده از روش المان محدود ارزيابي نمودند. تدسكو**[48]** از روش المان محدود براي مدلسازي يك پل بتنآرمه مقاومشده با FRP استفاده كرد. در اين تحقيق المانهاي TRUSS براي مدلسازي سيستم FRP به كار بردمشد.

کاچالاکف**[49]** مدل اجزاء محدود تير هاي بتني تقويتشده با مواد FRP را با استفاده از نرمافزار ANSYS طراحي نمود. به دليل وجود تقارن در تير اصلي يك چهارم تير مدل شد.



شکل ۶-۱- مدل اجزاء محدود تیر [49]

او براي حل معادلات و بهدست آوردن نمودار بار- تغيير مكان تير مورد مطالعه، از روش تحليل غير خطي نيوتن- رافسون استفاده نمود. به دليل رفتار غير خطي بتن مسلح، همگرايي مسأله بسيار مشكل بود، لذا در تحليل اين مدل, گامهاي بارگذاري متغيري از مقادير افزايش بار زياد در زماني كه رفتار مساله خطي بود, تا شدت اعمال بار كمتر در مرحله ايجاد ترك و تسليم آرماتورهاي داخلي آمده است.



شکل6-2- منحنی بار- تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی در مقایسه با مدل عددی[49]

همانطور كه مشاهده ميشود, نتايج بدستآمده از تحليل عددي و دادههاي آزمايشگاهي هماهنگي خوبي را نشان ميدهند.

در ادامه به منظور بررسي اثر تركيبات FRP در تقويت برشي تيرها, شبيهسازي مدل عددي تير بتنآرمه تقويتشده در برش مربوط به آزمايش نوريس, سعادتمنش و احساني ارائه ميشود[**50**].

2-6- مشخصات نمونه هاي آزمايشگاهي

نوريس و همكاران[50] در سال **1997** جهت ارزيابي اثر سيستمهايFRP براي مقاومسازي برشي تيرهاي بتنآرمه, آزمايشهايي بر روي چند نمونه تير بتني به طول (**48**in) 1220mm و با مقطع عرضي (8in*5in)mm 127*20mm انجام دادند. تقويتهاي فولادي داخلي تيرهاي مذكور شامل دو ميلگرد كششي به قطر 16mm، دو ميلگرد فشاري به قطر 9/5mm و خاموتهايي به قطر 6mm و به فاصله (8/1in)2055 در نظر گرفته شدند. شكل (6-3) ابعاد نمونه و محل تقويتهاي فولادي را نشان مي دهد.



شكل 8-٣- ابعاد نمونه و محل تقويت هاي فو لادي [50]

ابتدا تير فاقد سيستم مقاومسازي خارجي به عنوان تير كنترل (C48), مورد مطالعه قرار گرفت. شكل(4-6) نمودار بار-تغييرمكان تير كنترل را نشان ميدهد. همان طور كه مشاهده مي شود, اين تير در برش مي شكند. در شكل(6-5) تير كنترل, در مرحله شكست نشان داده شده است. در ادامه از ورق هاي CFRP به صورت پوشش U شكل, براي تقويت تير كنترل استفاده شد. اشكال(6-6) و (6-7) به ترتيب مربوط به نمودار بار-تغيير مكان تير آزمايشي مقاوم شده با يك لايه ورقه CFRP با زاويه الياف 45± درجه (IIIFu), و تير آزمايشي مقاوم شده با در مرحله شكست نشان داده شكست. در بر درجه (IEP), مي باشند، اشكال(6-8) و (6-9) تير هاي IIIFu و IIFu و ار در مرحله شكست نشان مي دهد.







شکل۶-۹- تیر IE در شکست[**50**]

شکل۶–۸– تیر IIIFu در شکست[۵۰]

3-6- مدل المان محدود با استفاده از نرمافزار ANSYS

ايجاد مدل المان محدود شامل مدلسازي هندسي, تعريف خصوصيات مواد مشابه نمونههاي آزمايشگاهي و مش**ب غدي صدل** ميباشد كه در اين مبحث به طور كامل به آن پرداخته ميشود.

1-3-6 انواع المان

در نرمافزار هاي المان محدود مدل هندسي به لحاظ تحليلي ارزشي ندارد (منظور از مدل هندسي, مدل حاوي نقطه، خط، سطح و حجم است) بلكه در اين نرمافزار ها اساس حل از روش تقسيم مدل به المانها انجام ميشود. اين المانها با توجه به نوع تحليل و درجات آزادي مورد نظر ميتوانند المانهاي سازهاي، حرارتي و ... باشند.

- با توجه به ويژگيها و رفتار قابل انتظار، از المانهاي زير در مدلسازي تير مورد نظر استفاده شد.
 - المان ساز هاي SOLID65 بر اي مدلكردن بتن
 - المان ميلهاي LINK8 براي مدلكردن أرماتور ها
 - المان ساز هاي SOLID45 جهت مدلكردن صفحات فلزي زيربار و در محل تكيهگاهها
 - المان ساز های-لایهای SOLID46 جهت مدل کردن سیستم FRP

SOLID65 المان سازهاي SOLID65

يك المان ساز هاي سه بعدي است كه دار اي هشت گره با سه درجه آزادي در هر گره **(3**درجه جابجايي انتقالي در جهت (X،Y،Z) ميباشد و بر اي مدلسازي بتن (با يا بدون آرماتور**),** مواد ژئوتكنيكي مانند سنگها و ... مورد استفاده قرار ميگيرد.

اين المان داراي قابليت هاي تغيير شكل پلاستيك، تركخور دكي در سه جهت عمود بر هم، خردشدكي، خزش، تغيير شكل و كرنش هاي بزرگ و سخت شدكي تنش مي باشد. هندسه و موقعيت گره ها براي اين نوع المان در شكل **(6-10)** نشان داده شده است[**51**].



شکل۶-۱۱- Solid65 [۵۱]

LINK8 المان ميلهاي LINK8

اين المان براي مدلكردن آرماتور هاي تقويتي فولادي مورد استفاده ميگيرد. همچنين از اين المان ميتوان براي مدل كردن اعضاء خرپا، كابلها، فنرها و ... استفاده نمود. اين المان داراي دو گره با سه درجه آزادي انتقالي درجهتهاي _x،y،z ميباشد و داراي قابليت تغيير شكل پلاستيك، خزش، تورم، سختشدگي تنش و تغيير شكلهاي بزرگ است. هندسه و موقعيت گرهها براي اين المان در شكل(11-6) نشان داده شده است[51].



شکل ۶–۱۱- هندسه وموقعیت گرههای المان Link8 [۵۱]

SOLID45- المان سازهاي-3-1-3-6

يك المان ساز هاي 8 گرهي بوده كه بر اي مدلسازي صفحات فولادي مورد نياز در نقاط بارگذاري و محل تكيهگاهها استفاده ميشود. اين المان دار اي 8 گره با سه درجه آز ادي در هر گره (سه درجه جابجايي انتقالي در جهتهاي X،Y،Z) ميباشد و قابليت شكلپذيري، خزش، بر آمدگي، تغيير شكلها و كرنشهاي بزرگ را دارد[**51**].



شكل Solid45 -11-9 [51] Solid45

SOLID46 المان سازهاي-لايهاي SOLID46

اين المان داراي خواص مشابه المان SOLID45 است كه خاصيت لايهاي را علاوه بر ساير خواص دارد. و براي مدلسازي پوسته هاي ضخيم لايهاي و احجام لايهاي با امكان تعريف **250** لايه با ضخامت ثابت در هر المان و **125** لايه با ضخامت متغيير به طور خطي مورد استفاده قرار ميگيرد. هندسه و موقعيت گره ها در شكل(**6-13)** نشان داده شده است.

براي مدلسازي مواد مركب از اين نوع المان استفاده شده است. مدلسازي مواد مركب نسبت به موادي نظير آهن و فولاد مشكلتر است بنابراين بايد در مدلسازي اين مواد نهايت دقت در معرفي خواص و جهت لايهها به كار رود[**51**].



شكل Folid46 -18-8 [51] Solid46

6-2-3- خواص مواد

يكي از مراحل مهم در مدلسازي تيرهاي بتنآرمه, با نرم**اف زا ر** ANSYS تعيين خصوصيات مواد مختلف به كار رفته نظير بتن، فولاد و FRP است. اين خصوصيات ميتواند شامل جنس، خصوصيات مكانيكي و حرارتي ماده مورد نظر باشد. به علت وجود پارامترهاي متعدد مؤثر در تعريف رفتار هر يك از مواد مورد استفاده, در اين بخش اختصاصات رفتاري هر يك به صورت كامل تشريح ميشود.

6-3-1-2 بتن

بتن مادهاي است كه داراي مقاومت زيادي در فشار است و از اين رو استفاده از آن براي قطعات تحت فشار, مانند ستونها و قوسها بسيار مناسب ميباشد. ليكن علير غم مقاومت فشاري قابل توجه، مقاومت كششي كم و شكنندگي نسبتاً زياد اين ماده، استفاده از آن را براي قطعاتي كه تماماً يا بهطور موضعي تحت كشش هستند, محدود مينمايد. از آنجاييكه بتن مادهاي شكننده بوده و رفتار آن در ناحية كششي و فشاري متفاوت است، ارائه مدل عددي مناسب براي مشخص كردن رفتار اين ماده امري مشكل ميباشد. در شكل (**14-11)** منحني تنشكرنش بتن نشان داده شده است.



شكل14-6- منحني تنش- كرنش بتن [52]

همانطوركه در تصوير مشاهده ميشود، در ناحيه فشاري، تقريباً تا حدود 30 درصد ماكزيمم مقاومت فشاري بتن، رفتار منحني, خطي و الاستيك بوده، پس از اين مرحله تنش به تدريج تا زماني كه بتن به ماكزيمم مقاومت خود برسد, افزايش مييابد، سپس با ورود منحني داخل يك ناحية نرم تنش نيز كاهش يافته و سرانجام گسيختگي بتن در اثر خرد شدن در كرنش نهايي (ع) رخ ميدهد. از طرفي مقاومت كششي بتن حدود 8 تا 15 درصد مقاومت فشاري آن است و در ناحية كششي رفتار منحني تنش-كرنش, تا ماكزيمم مقاومت كششي، تقريباً خطي و الاستيك بوده، پس از آن بتن ترك

6-2-3-1 معيار كسيختكي بتن

روشهاي گسيختگي بتن شامل تركخوردن و خردشدن است و يك مدل دقيق بايد توانايي پيشبيني سطح شكست را براي چنين مادهاي داشته باشد. از آنجاييكه گسيختگي بتن ناشي از حالت تنش چند محوري است، لذا براي تعيين يك سطح شكست مناسب براي عضو بتني هر دو پارامتر مقاومت فشاري نهايي و مقاومت كششي نهايي بتن مورد نياز ميباشند**[49].**

در شكل**(6-15)** يك سطح شكست سه بعدي براي بتن نشان داده شده است. تنشهاي اصلي غير صفر، تنشهايي هستند كه در جهتهاي x و y قرار دارند و به وسيله σ_{xp}, σ_{xp} نمايش داده مي شوند. مد گسيختگي تابعي از σ_{xp} (تنش اصلي در جهت z) مي باشد. به عنوان مثال اگر σ_{xp}, σ_{xp} هر دو منفي (فشاري) و σ_{xp} مثبت (كششي) باشد، بتن در اثر ترك خوردن در سطحي عمود بر سطح σ_{xp} از بين مي رود. ولي چنانچه σ_{xp} صفر و يا منفي باشد, گسيختگي بتن در اثر خرد شدن خواهد بود.



شكل15-6- سطح شكست سه بعدي براي بتن [49]

در يك المان بتني زماني كه تنشهاي كششي در همة جهات بيرون سطح شكست قرار بگيرند، ترك ايجاد شده و مدول الاستيك المان بتني در جهتي موازي با جهت تنش اصلي كششي صفر ميشود. ولي در صورتي كه همة تنشهاي اصلي فشاري بوده و بيرون سطح شكست قرار بگيرند, المان بتني خرد شده و در نتيجه مدول الاستيك در همه جهتها صفر، و المان از بين ميرود[**49].**

با توجه به بررسيهاي انجام شده مشخص شد كه اگر قابليت خردشدگي بتن فعال باشد, مدل اجزاء محدود تير خيلي زود و نابهنگام گسيخته ميشود. در اين حالت خردشدن بتن از المانهايي كه مستقيماً زير بارها قرار دارند, شروع به رشد ميكند و در نتيجه المانهاي بتني مجاور طي چندين بارگذاري خرد شده و سختي موضعي كاهش مييابد، سرانجام مدل, يک تغيير مكان بزرگ نشان داده و رامحل واگر ميشود. از طرفي ميدانيم امكان شكست بتن تحت فشار خالص خيلي كم است و در يک آزمايش فشاري كه نمونه تحت فشار تک محوري قرار دارد كرنشهاي كشي به وسيله اثر مياشد ابتدا ترك خورده، سپس گسيخته ميشود. بنابر اين در تحليل اين مدل قابليت خردشدي ميباشد ابتدا ترك خورده، سپس گسيخته ميشود. بنابر اين در تحليل اين مدل قابليت خردشدي بين غير فعال و گسيختگي مدل اجزاء محدود تير توسط تش كششي بين دندگي بين

6-2-1-2-3 داده هاي ورودي اجزاء محدود براي بتن

در مدلسازي تير هاي بتني به وسيله نرمافزار ANSYS سه نوع رفتار براي بتن قابل پيشبيني است كه عبارتند از [51]:

1- مدل رفتاري خطي كه در آن تنها مدول الاستيسيته و ضريب پواسون بتن داده شده و رفتار بتن در 3 جهت يكسان(همسانگرد) در نظر گرفته ميشود.

2- مدل رفتاري Concrete: در اين مدل رفتاري از سطح شکست ويليام-رانکل⁷⁶ استفاده ميشود و در آن ضرايب انتقال برش در حالت ترک باز و بسته, تنش فشاري تک و دو محوره بتن و تنش

v- William-Wrankle

تركخوردگي بتن تعريف ميگردد. به كمك اين مدل رفتاري ميتوان رفتار غيرخطي بتن در اثر خردشدگي(براثر تنش فشاري) و تركخوردگي(بر اثر تنش كششي) را بهخوبي مدل كرد, ولي در اكثر تحقيقات انجامشده براي مدلكردن بتن به روش اجزاي محدود از رفتار 3 محوره بتن در فشار به دليل شرايط خاص بارگذاري, صرفنظر شده و به جاي آن رفتار فشاري بتن را صرفاً به صورت تك محوره و به صورت منحني سهموي هوگنستاد يا كنت وپارك و ... در مدل MISO تعريف ميكنند.

3- مدل رفتاري7⁷MISO: دراين مدل, رفتار فشاري بتن در حالت تک محوره به صورت منحني سهموي يا 2 خطي(بسته به تقريب مورد نظر) تعريف مي شود.

به طور كلي پارامتر هاي مورد نياز براي تعريف رفتار بتن در نرمافزار ANSYS را ميتوان به صورت زير خلاصه نمود**[49].**

1- مدول الاستيسينه بتن(E_c)
 2- مقاومت فشاري نهايي(j'_c)
 3- مقاومت كششي نهايي(مدول گسيختگي f_r)
 4- ضريب پواسون(υ)
 5- ضرايب انتقال برش براي ترك باز وترك بسته(β و β)

6۔ روابط تنش-کرنش در حالت تک محوري و فشاري براي بتن

در تير مدل، مدول الاستيسيته بتن با استفاده از رابطة**(3-1)** محاسبه شد. (در اين رابطه واحدها بر حسب پوند بر اينچ مربع (psi) ميباشند**) [53].**

$$E_{c} = 57000 \sqrt{f_{c}'} \tag{1-?}$$

مقادير مربوط به مقاومت كششي و فشاري نهايي و نيز ضريب پواسون, مطابق مقادير آزمايشگاهي مندرج در مقاله نوريس و همكاران تعريف شد.

ضريب انتقال برش, β , نشاندهنده شرايط سطح ترك در يك المان بتني است و دامنه تغييرات آن بين صفر تا يك ميباشد، هنگامي كه دو طرف ترك نسبت به هم بلغز د(اتلاف كامل انتقال برش) يا به اصطلاح ترك صاف باشد، مقدار β , كم بوده و تقريبا برابر صفر در نظر گرفته ميشود, ولي در صورتيكه دو طرف ترك با يكديگر اصطكاك داشته و به اصطلاح سطح ترك زبر باشد, مقدار β , برابر يك است[49].

v- Multilinear Isotropic

مطالعه بین 0/15 تا 0/2 در نظر گرفته شد. خلاصهای از مشخصات بتن استفاده شده در مدل اجزاء محدود مورد مطالعه در جدول (1-6) آمده است.

	E _C GPa	f'c MPa	f _r MPa	ν	β_t	β_c
مشخصات بتن	۳۰/۱۸۶	36/2	۲/۱۷۶	•/٢	٠/١۵	• /٢

جدول1-6- مشخصات بتن

در اين تحقيق, از معادلات (2-6) و (3-6) و (4.6) براي ساخت منحني تنش-كرنش تكمحوري و فشاري بتن كه در شكل (16-6) نشان داده شده است، استفاده شد [55،54].

$$f = \frac{E_{\rm C} \cdot \varepsilon}{1 + (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})^2}$$
(Y-Y)

$$\mathcal{E}_{0} = \frac{2f_{C}'}{E_{C}}$$

$$E_{C} = \frac{f}{\varepsilon}$$
(Y-Y)
(Y-Y)

در روابط فوق:

تنش در هر نقطه : *f*

کرنش در هر نقطه : ع

 ε_0 : (f'_c) کرنش در مقاومت فشاري نهايي



شكل6-16- منحني تنش- كرنش تك محوري فشاري [49]

همان طور كه در شكل فوق مشاهده مي شود, مقدار تنش در نقطه شماره يك برابر با 0.3 *f*['] است، با قرار دادن اين مقدار در معادلة **(4.6)** كه نشان دهندة رابطة تنش-كرنش بتن در ناحيه خطي مي باشد،

$$f_1 = 0.3 f_c' = 10950000$$

$$E_c = \frac{f_I}{\varepsilon_I} \Longrightarrow 28.6 \times 10^9 = \frac{10950000}{\varepsilon_I} \Longrightarrow \varepsilon_1 = 3.83 \times 10^{-4} \text{ m/m}$$

 $\varepsilon_2 = 0.0006 m/m$

$$f_2 = \frac{E_c \varepsilon_2}{1 + {\epsilon_0^2 \choose \varepsilon_0}^2} \Longrightarrow f_2 = 1.6266 \times 10^7 \text{ pa}$$
$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_C} \Longrightarrow \varepsilon_0 = 0.00255 \quad m/m$$

$$\varepsilon_1 = 0.000383 \quad m/m \Longrightarrow f_3 = 1.095 \times 10^7 \text{ pa}$$

$$\varepsilon_2 = 0.0006 \quad m/m \Longrightarrow f_3 = 1.6266 \times 10^7 \text{ pa}$$

$$\varepsilon_3 = 0.0013 \quad m/m \Longrightarrow f_3 = 2.9521 \times 10^7 \text{ pa}$$

$$\varepsilon_4 = 0.0019 \quad m/m \Longrightarrow f_4 = 3.4954 \times 10^7 \text{ pa}$$

$$\varepsilon_5 = 0.00255 \quad m/m \Longrightarrow f_5 = 3.650 \times 10^7 \text{ pa}$$



شكل17-6- منحني تنش-كرنش تكمحوري فشاري بتن تعريف شده در ANSYA

2-2-3-6 تقويتها و صفحات فولادي

همانطور كه قبلا" بدان اشاره شد, براي مدلكردن ميلگردهاي فولادي از المان Link8 با در نظر گرفتن رفتار ايزوتوپيك خطي براي آن, استفاده ميشود. مشخصات ميلگردهاي فولادي نظير مدول الاستيسيته، تنش تسليم و ضريب پواسون براي مدل المان محدود مشابه مشخصات مورد استفاده در آزمايش در نظر گرفته شد.

	جدول 6-2- مشخصات فولاد				
	Es GPa	f _y MPa	V		
مشخصات فولاد	200	47.	۰/٣		

به طور كلي دو نوع رفتار تعريف شده, براي مدل المان محدود ميلگردها به قرار زير مي*ب للشد*[51].

1- رفتار خطي: مانند بتن ابتدا رفتار فولاد همسانگرد در نظر گرفته شده و تنها مدول الاستيسيته و ضريب پواسون آن تعريف ميشود.
 2- رفتار چند خطي ايزوتروپيك: در اين مدل رفتاري، فولاد به صورت دو خطي و الاستوپلاستيك ايده آل در نظر گرفته ميشود و در كشش و فشار يكسان عمل مىكند(شكل(6-19)).



شكل-19-6- منحني تنش - كرنش فولاد تعريف شده در ANSYA

شكل6-18- منحنى تنش - كرنش فولاد [49]

صفحات فلزي نصب شده در موقعيت تكيهگاهها و نقاط بارگذاري به عنوان مواد ايزوتروپيك خطي با مدول الاستيسيته برابر مدول الاستيسيته ميلگردهاي فولادي و ضريب پواسون 0/3 تعريف ميشوند.

FRP تركيبات -3-2-3-6

Compressio

همانطور كه در فصلهاي قبل تشريح شد، مواد FRP از دو جزء اصلي الياف و رزين تشكيل شدهاند. الياف يا همان فيبرها از نوع الاستيك هستند كه بسيار مقاوم و جزء اصلي باربر در تركيب FRP محسوب ميشوند. رزين يا پليمرها مقاومت كمتري نسبت به فيبرهاي تقويتي داشته و به عنوان محيط چسباننده فيبرها, مورد استفاده قرار ميگيرند. مواد FRP به طور كلي در دسته مواد آنيزوتروپيك قرار ميگيرند, يعني خواص آنها در جهات مختلف، متفاوت است. شکل (19-6) طرحي کلي از مواد FRP را نشان ميدهد.



شكلFRP طرحي كلي از مواد FRP [49]

چنانچه در شكل مشاهده ميشود, ورق هاي يك جهته داراي سه سطح عمود بر هم از مشخصات مواد هستند. رفتار مواد مركب در مدل مورد مطالعه به صورت خطي و ارتوتروپيك در نظر گرفته ميشود. به عبارت ديگر مدول الاستيسيته، ضريب پواسون و مدول برشي در جهت اصلي با دو جهت متعامد ديگر متفاوت بوده و از ضوابط مصالح ارتوتروپيك پيروي ميكنند. پار امتر هاي مورد نياز براي مدلسازي مواد FRP در نرمافزار ANSYS عبارتند از [49]: 1- تعداد لايه ها

جدول (4-3), مشخصات مواد مركب استفاده شده در مدل مور دنظر را نشان ميدهد.

جدول6-3-6 مشخصات مواد مركب

سیستم CFRP	تعداد لايه	ضخامت mm	مقاومت کششي MPa	مدول طولي	مدول عرضي	مدول برشي	ضريب پواسون
١	٢	1/499	۱.۴/۷	۲۸/۳	۲۸/۳	? /٣	•/•4
٢	١	١/•٩٢	11/٣	۳۴/۱	۴/۶	۶/٣	•/٣۶

6-2-3-1- اختصاص دادن معيار شكست

در نرمافزار ANSYS، **3** معيار شکست لايهها بهعلاوه معيار شکست تعيين شدة کاربر⁷⁸ را ميتوان در بررسي تخريب لايهها به کار برد اين معيار ها عبارتند از:

- 1۔ معیار شکست بر اساس ماکزیم کرنش ها
- 2۔ معیار شکست بر اساس ماکزیم تنش ہا

3ـ معیار شکست wu – Tsai – wu, که با تعیین 9 ننش و 3 ضریب کوپلینگ تعیین میشد و د.[45] معیار شکست برای مدل مورد نظر براساس ماکزیمم ننش ها با تعیین 9 ننش در نظر گرفته شد.

6-3-3- ابعاد و هندسه مدل

تير هاي بتني مورد مطالعه با ابعادي مشابه ابعاد تير هاي آزمايشگاهي مدلسازي شدند. شکل هاي **(6-**21) و **(6-22)** مدل هندسي تير مذکور را قبل از تقويت با ورق هاي CFRP نشان ميدهد.



شكل21-6- ابعاد مدل

شکل**22-6۔** مدل هندسي تير در نرمافزار ANSYA

1⁻user written criterria



شكل**6-23-** نحوه قرارگيري تقويتهاي فولادي

در شكل**(23-6)** نحوه قرارگيري تقويتهاي فولادي براي تير مدل نشان داده شده است. در اين تحقيق از لغزش آرماتورها صرف نظر شده و پيوند بين FRP و سطح بتن كامل فرض مي شود. براي در نظر گرفتن فرضيه چسبندگي كامل, گرههاي هر المان بايد كاملا بر گرههاي المان مجاور منطبق باشند.

ورقهاي CFRP براي تقويت برشي تيرها با ضخامت**ه /** و الگوهاي **صخ ته لف** مورد استفاده قرار گرفتند. و با توجه به نمونههاي آزمايشي تقويتشده و به منظور ارزيابي برخي از پارامترهاي مؤثر در تقويت برشي از شيوههاي تقويتي مختلف در اين مطالعه بهره گرفته شد.

در اين تحقيق از مدلسازي لايه چسب صرفنظر شده و چسبندگي بين FRP و بتن به صورت كامل در نظر گرفته شد.



شكل24-6- اتصال المان ها, (a) المان هاي بتن و ميلكردهاي تقويتي؛ (b) المان هاي بتن و FRP[49]

4-3-6 شبكهبندي مدل

انتخاب تراكم شبكه يكي از مهمترين مسائل در مبحث مدلسازي با نرمافزار هاي مختلف المان محدود است. زيرا همگرايي نتايج زماني حاصل ميشود كه تعداد مناسبي از المانها, مورد استفاده قرار گيرد. شكل**(6-25)** نمودار دقت نتايج با توجه به تعداد المانها را نشان ميدهد. همانطور كه از نمودار بر ميآيد با افزايش تعداد المانها، دقت تقريب در مدل اجزاء محدود افزايش مييابد, اما افزايش بيشتر تعداد المانها اثر ناچيزي بر روي دقت نتايج خواهد داشت.



شکل25-6- تاثیر تعداد المانها در دقت پاسخ به دست آمده در روش اجزاء محدود[56]

در مدل المان محدود تير مورد بحث، چند نوع شبكهبندي با تعداد المان هاي مختلف به منظور تعيين تعدين تعدين تعدين تعدين تعدين المان بررسي شد. نتايج اين بررسي ها در شكل (6-26) نشان داده شده است.



شكل26-6- تغبير مكان وسط دهانه بر اساس تعداد المانها

مشاهده ميشود كه با افزايش تعداد المانها به بيش از **1296** المان, تغيير مكان وسط دهانه تغيير چنداني نميكند از طرفي افزايش بيشتر تعداد المانها سبب ميشود كه همگرايي مسأله در بار هاي بالاتر مشكل شود, لذا مدل المان محدود شامل **1440** المان بتن براي اين تحقيق در نظر گرفته شد.

شكلهاي**(6-27)، (6-28)** و **(6-29)** شبكهبندي قسمتهاي مختلف تير را نشان ميدهند. همانطور كه مشاهده ميشود در ناحيه بارگذاري براي جلوگيري از تمركز تنش از شبكهبندي ريزتري استفاده شده است.



شكل**6-27-** شبكهبندي تير بتني



شكل**6-28-** شبكهبندي CFRP (پوشش U شكل)



شكل6-29- شبكهبندي ميلكردهاي فولادي

5-3-6 بارگذاري و شرايط تكيهگاهي

مدل المان محدود در موقعيتهايي مشابه نمونههاي آزمايشي بارگذاري شد. براي جلوگيري از تمرکز تنش در محل اثر بارها و موقعيتهاي تکيهگاهي, از ورقهاي فولادي به ابعاد تقريبي 0/127*0/0137*0/012 در محل اثر بارها, و 0/0225*0/0225 0/02 در محل تکيهگاهها استفاده شد.

اشكال (30-6) و (31-6) شرايط تكيه گاهي مدل را نشان ميدهند.



شکل6-30- شرایط تکیه کی اه مدل



شكل**6-31-** موقعيت ورق هاي فولادي در محل دو تكيه **گا 0** و زير بار ها

در محل تكيهگاهها براي ايجاد قابليت چرخش تير، قيدهاي تكيهگاهي فقط در يك رديف تعريف ميشوند.



شكل**6-32-** نحوه اعمال قيدهاي تكيه **ك ا ٥**ي

مطابق شکل**(6-33)** چنانچه از چرخش ورق تکيهگاهي جلوگيري شود, تركهاي موضعي در آن محل به وجود ميآيد.



شكل6-33- تغيير مكان مدل, (a) بدون چرخش صفحه فو لادي؛ (b) با چرخش صفحه فو لادي

6-4- روش تحليل

يكي از مسائل مهمي كه در مبحث بتنآرمه همواره مورد توجه بوده, رفتار متفاوت بتن تحت اثر بارهاي خارجي به علت خواص غير خطي و مقاومت كششي كم آن است. در شروع بارگذاري، به علت پايين بودن مقدار تنشهاي كششي و فشاري در بتن، قطعه به صورت الاستيك و خطي عمل ميكند. در تحليل خطي رفتار سازه را در اين ناحيه مي پندارند. در اين بازه ماتريس هاي مواد و سختي ثابتند و بارگذاري بر روي آنها اثري ندارد. در برابر آن غير خطي بودن رابطه تنش-كرنش سبب تغيير ماتريس مواد مي شود. به عبارت ديگر اين ماتريس تابعي از تغيير مكان هاي گرهي است. در نتيجه معادله حاكم بر رفتار سازه به صورت غير خطي در مي آيد. مواد و فولاد نرم داراي رفتار غير خطي هستند.

در تحليلهاي غير خطي، كل بار خارجي در چند قسمت كوچك تحت عنوان گامهاي بارگذاري بر سازه وارد ميشود. روشهاي گوناگوني براي حل دستگاه معادلات غير خطي وجود دارد كه از آن جمله ميتوان به فن تكراري نيوتن رافسون اشاره كرد. نرم افزار ANSYS نيز در تحليلهاي غير خطي از اين روش استفاده مينمايد. در روش مذكور، تحليل غيرخطي با يك مجموعه از تحليلهاي خطي صورت ميگيرد. نخستين تحليل، زير اثر بار خارجي وارد به سازه انجام ميپذيرد. در تحليلهاي بعدي، نيروي ناميزان (اختلاف نيروي خارجي نخستين و نيروي داخلي كنوني) وارد تحليل ميگردد. هر گام تحليل، يك گام تكراري خواهد بود. لازم است توجه شود كه تغيير مكان به دست آمده در هر تكرار، با مجموع تغيير مكان تحليلهاي پيشين جمع ميگردد. تكرارها تا زماني ادامه مييابند كه نيروي ناميزان از مقدار مشخصي كمتر شود. به اين مقدار خط گويند[57]. شكل(34-6) كاركرد اين روش را نشان ميدهد.


شكل6-34- فن تكراري نيوتن رافسون [57]

تحليل مدل مورد نظر نيز به روش تحليل غير خطي هندسي استاتيكي انجام شد. در اين روش نرمافزار بار را به تدريج افزايش ميدهد تا جاييكه سازه به مرز ناپايداري ميرسد. در اين حالت فعال كردن الگوريتم گام زماني خودكار و دو نيمهسازي در حل قوياً توصيه ميشود. الگوريتم گام اتوماتيك زماني به طور خودكار به دنبال بار ميگردد، در صورتيكه بار خطي در تحليل استاتيكي غير خطي اعمال شده باشد، و اين الگوريتم نيز فعال باشد، هنگام حل مساله در صورتيكه همگرايي در نقطهاي از بارگذاري ارضاء نشود، الگوريتم به طور خودكار نمو بارگذاري تعيين شده را نصف كرده و حل را دوباره ادامه ميدهد تا جاييكه با اعمال كوچكترين نمو در بار همگرايي ايجاد نشود. براي حل عددي مسائل غير خطي بايد به موارد زير توجه شود.

٢- المان بندي مدل با دقت انجام شود، المان هاي با اخطار هاي مربوط به شكل المان ميتواند منجر به واگرايي در يک مساله غير خطي شود.
2- تعداد نمو هاي بار متناسب با شرايط مساله به اندازه کافي انتخاب شود.
3- انحر اف ها(تلر انس ها)، نوع المان انتخاب شده، و مبناي همگرايي نيز در برخي موارد ميتواند عاملي در همگرا شدن يا نشدن يک مساله غير خطي باشد[46].

براي آناليز، دو معيار همگرايي نيرو و تغيير مكان مورد استفاده قرار گرفت. در ابتداي حل، حدود تلرانس همگرايي همان مقادير پيش فرض ANSYS در نظر گرفته شد, اما پس از ايجاد ترك، همگرايي براي آناليز غيرخطي با معيار هاي قراردادي بسيار مشكل بود, لذا همگرايي نيرو حذف شده و همگرايي تغيير مكان افزايش يافت.

5-6- مقايسه نتايج

در اين بخش نتايج حاصل از آناليز المان محدود مورد بررسي قرار ميگيرند. موارد ارزيابي شده به شرح زير ميباشند.

۵- نمودار بار-تغيير مكان وسط دهانه
۶- نمودار بار-كرنش در محلهاي انتخابي

۲- توزیع ترك در طول بارگذاري
۸- تعیین بار شكست

1-5-6- مقايسه نتايج حاصل از آناليز المان محدود و نتايج آزمايشگاهي

ابتدا براي تأييد صحت نتايج حاصل از آناليز المان محدود, تيرهاي آزمايشگاهي در نرمافزار ANSYA مدل شدند. تغيير مكان مدلها, در موقعيتي مشابه تيرهاي مذكور (وسط دهانه), اندازهگيري شد. شكلهاي (**35-6**)، (**36-6**) و (**37-6**) نمودارهاي بار- تغيير مكان حاصل از نتايج آزمايشگاهي و آناليز المان محدود را براي تيرهاي كنترل، تير مقاومشده با يك لايه ورقه CFRP با زاويه الياف **±45** درجه, با عنوان U45/135 و تير مقاومشده با دو لايه ورقه CFRP با زاويه فيبر (U90), نشان مي دهد.



شکل-36-6 نمودار بار - تغییر مکان تیر U45/135



شکل**37-6۔** نمودار بار – تغییر مکان تیر U90

همانگونه که مشاهده ميشود, نمودار هاي بار - تغيير مکان حاصل از آناليز المان محدود هماهنگي خوبي با نتايج آزمايشگاهي دارند, اين هماهنگي در جدول(4-4) نيز به وضوح مشاهده ميشود.

، U45/135 وU90	کنترل	تير هاي	مقايسه	-4-6	جدوا
----------------	-------	---------	--------	-------------	------

	تغيير مكان نهايي (mm)		بار نهايي(kN)			درصد افز ایش مقاومت بر شي نسبت به تیر کنترل(%)		
بير	ANSYS	آزمايش	اختلاف(%)	ANSYS	آزمايش	اختلاف(%)	ANSYS	آزمايش
كنترل	۴/۵	۸/۰۲۱	۲۸/۲۴	111	1.9/80	٩/١٨	-	-
U45/135	9/471	٩/٦٧	1/99٣	۱۹۳	١٩١	١/•۴٧	94/90	V4/94
U90	٩/٣	14/9	۵۷	141	147	•/9٨	89/0	84/41

همانطور كه در هر سه شكل مشهود است, تير مدل شده در روش المان محدود از تير واقعي سختتر ميباشد. دو عامل مؤثر در بالاتر بودن سختي مدل المان محدود نسبت به تير هاي واقعي را به صورت زير ميتوان تشريح نمود.

1- تركهاي ريز ايجاد شده به دليل انقباض ناشي از خشك شدن بتن كه باعث كاهش سختي تيرهاي واقعي ميشود و در مدل المان محدود منظور نمي كردد.

2- در نظر گرفتن فرضيه پيوند كامل بين بتن و آرماتور هاي فولادي در مدل هاي المان محدود كه در تير هاي واقعي صادق نيست و با لغزش آرماتور ها عملكرد تركيبي بتن و فولاد در اين تير ها از بين مي رود.

شكل**(38-6)** اختلاف رفتار بار- تغيير مكان حاصل از نتايج آزمايشگاهي و مدلسازي ANSYS را براي سه تير معرفي شده, نشان ميدهد. همانطور كه ملاحظه ميشود, سختي تير ها قبل و بعد از مقاومسازي با FRP در ناحيه خطي مشابه هستند. پس از ايجاد تركهاي اوليه تير هاي مقاومشده با FRP داري سختي بيشتري نسبت به تير كنترل هستند كه با نتايج آزمايشگاهي نيز سازگار است.



شكلU45/135, مقايسه نمودار بار – تغيير مكان تير هاي كنترلU45/135, وU90: الف) بر اساس نتايج آزمايشگاهي, ب) بر اساس نتايج ANSYS

2-5-6- ارزیابی اثر ضخامت بر تقویت برشی تیرها

همچنانكه پيش از اين نيز بدان اشاره شد, ضخامت FRP از عواملي است كه ميتواند در تقويت برشي تيرها مؤثر باشد. نتايج آزمايشهاي مختلف انجام شده نيز گوياي اين مطلب است. در اين قسمت براي ارزيابي اثر اين پارامتر با استفاده از روش آناليز المان محدود از سه نمونه تير مقاوم شده با 2 لايه ورقCFRP سيستم 2, با ضخامتهاي 0/546, 1092 و 1/098 ميليمتر براي هر لايه با جهت الياف 90 درجه به ترتيب با عنوان تير (1-190), (2-190) و (1-900) بهره گرفته شد.

اشكال(**39-6)، (40-6)** و (**41-6)** مدل هندسي, نحوه مشيندي و جهت الياف در هر لايه را براي سه تير مذكور نشان ميدهد.





شكل**6-39-** مدل هندسي تير هاي مقاومشده با پوشش U شكل

شكل40-6 شبكهبندي تير هاي مقاومشده با پوشش U شكل



شكلU90-2 , U90-1 و تير هاي U90-2 و U90-2 و U90-3 و

6-2-5-1- نمودار بار-تغيير مكان

شكل (42-6) مقايسه رفتار بار-تغيير مكان تير هاي (1-U90), (2-U90) و (3-U90) را نشان ميدهد. همچنانكه ملاحظه مي شود, با افزايش ضخامت تقويت بر شي تأمين شده توسط FRP به تدريج بهبود مي يابد.



شكل42-6- مقايسه نمودار بار-تغيير مكان تير هاي كنترل,1-U90, 2-U90 و 3-U90 بر اساس نتايج ANSYS

2-2-5-6 كرنش كششي در ميلگردهاي فولادي

براي تير هاي (1-U90), (2-U90) و (3-U90) كرنش ميلكردهاي كششي در وسط دهانه با استفاده از دادههاي نرمافزار ANSYS ارزيابي شدند. مقايسه نمودار بار-كرنش كششي براي ميلكردهاي فولادي اصلي، براي 3 تير مذكور را در شكل(**43-6)** ميتوان ملاحظه نمود.



شكل6-43- مقايسه نمودار بار-كرنش

همانطور كه مشاهده ميشود, با افزايش ضخامت CFRP، ميلگردهاي كششي در لحظه تسليم, بار بيشتري را تحمل ميكنند, اما اين ميزان افزايش بسيار ناچيز است.

بدين ترتيب ملاحظه ميشود كه در تير بتني داراي رفتار ارتوتروپيک، تقويت در يک جهت بر جهت ديگر نيز اثرگذار است اما ميزان تأثير تقويت بر جهات ديگر ناچيز و قابل اغماض ميباشد. اين پديده ميتواند به علت محدود شدن گسترش و بازشدگي ترکها به سبب حضور FRP باشد.

نتايج مطالعات نشان ميدهد كه كرنش ميلگردهاي كششي بدست آمده از روش المان محدود و كرنشهاي واقعي تيرهاي آزمايشگاهي در محدوده خطي هماهنگي بسيار خوبي با هم دارند, اما پس از ترک خوردگي بتن، ناهماهنگي بين نتايج حاصل، مشاهده مي شود. به طور كلي، كرنشهاي موجود در ميلگردهاي كششي, در اين ناحيه براي مدل المان محدود بيشتر از مقادير به دست آمده از تيرهاي آزمايشگاهي است.

در يک تير بتنآرمه در يک بار به اندازه کافي بزرگ، بتن مقاومت کششي خود را از دست داده و همانگونه که در شکل(44-6a) مشاهده مي شود, ترکهايي در ناحيه کششي تير رخ مي دهد. بين ترکها، بتن مقداري مقاومت کششي به وسيله تنش پيوستگي در جهتي که در شکل(44-6b) نشان داده شده, از خود نشان مي دهد. اين عمل سبب کاهش تنش کششي در فولاد تيرهاي واقعي شکل(64-44)) مي شود.



شكل**6-44-** تغييرات نيروي كششي در فولاد, براي تيرهاي بتنآرمه واقعي, a) نمونه ترك, b) مقطع بتني تركخورده, c) تنشهاي پيوستگي در ميلگردهاي تقويتي, b) تغييرات نيروي كششي در فولاد [**49**]

شكل(6-45) كسترش نيروي كششي را در فولاد, براي مدلهاي المان محدود نشان ميدهد. در مدل المان محدود تركها به صورت پخشي در نظر گرفته ميشوند. در روش ترك پخشي، تركها در سرتاسر ناحيهاي كه تنشهاي كششي اصلي در المانهاي بتن از مقاومت نهايي آن بيشتر ميشود، كسترش مييابند(شكل (6-44ه) و (4**6-44)).** در اين حالت سختي بتن تركخورده به سمت صفر ميل نموده و ديگر قادر به تحمل نيروهاي كششي نميباشد. بنابر اين كشش در المان فولادي براي مدل المان محدود مانند تيرهاي واقعي متغير نبوده و مطابق شكل (6-45) در امتداد المان, ثابت است. به همين دليل همواره كرنشهاي ايجاد شده در مدل المان محدود بيشتر از كرنشهاي واقعي اندازهگيري شده خواهد بود.



شكل**6-45-** تغييرات نيروي كششي در فولاد, براي مدل المان محدود, a) نمونه ترك, b) مقطع بتني تركخورده, c) تغييرات نيروي كششي در فولاد [**49**]

3-2-5-6 تنش در میلگردهای کششی فولادی

شكل (46-6) نمودار تنش- كرنش را براي تير مدل 3-U90 با استفاده از نتايج ANSYS نشان ميدهد. همان طور كه مشاهده مي شود, اين نمودار از همان منحني تنش-كرنش الاستو پلاستيك ايده آل فولاد تبعيت ميكند. در ساير مدل ها نيز همين رفتار مشاهده شد.



شكل-46-6 نمودار تنش-كرنش ميلكردهاي كششي در تير 3-U90

4-2-5-6- بار ترک خوردکي اوليه و گسترش ترکها

بار تركهاي اوليه در مدل المان محدود, كام باري است كه نشانههاي اوليه ترك خوردكي در تير ظاهر ميشود. شكل**(47-6)** تركهاي اوليه ايجاد شده در تيرهاي (1-U90), (2-U90) و (3-U90) را نشان ميدهد.



شكل**47-6-** ترك هاي اوليه ايجاد شده در تير هاي (1-U90), (2-U90) و (U90-3)

معمولا بار تركخوردگي اوليه نتيجه شده از برنامه ANSYS بيشتر از مقدار به دست آمده از تير واقعي است كه ميتواند به دليل همگن بودن نسبي مدل المان محدود در مقايسه با تير هاي آزمايشگاهي باشد.

در نرمافزار ANSYS، خروجي هاي المانSolid65 نظير تنشها، كرنشها و... در نقاط انتكرال گيري محاسبه مي شوند. شكل **(48-6)** نقاط انتكرال گيري المان بتن را نشان مي دهد. علامت هاي مربوط به تركخور دكي نيز در اين نقاط ظاهر مي شوند. اين علائم به صورت دايره هايي عمود بر جهت تنش اصلي، مطابق شكل **(49-6)** به وجود مي آيند.

شكل(6-06) به طور نمونه تركها را در مدل المان محدود تير (2-190) نشان ميدهد. همان طور كه در شكل(50-6a) مشاهده مي شود, در وسط تير تنشهاي كششي در جهت x بوده و بنابر اين دو اير مشخص كننده ترك عمود برجهت x ظاهر مي شوند. اين نوع ترك ها بيان گر تركهاي خمشي هستند. شكل(50-6b) نشان دهنده نمونه تركها در زير محل بارگذاري است. براي سازه بتني در معرض فشار تك محوري تركها اساسا موازي جهت بار فشاري وارده گسترش مييابند، اين تركها از كرنشهاي كششي توسعه يافته به دليل اثر پو اسون نتيجه مي شوند. رفتار مشابهي در مدل هاي المان محدود مشاهده مي شود. بارهاي در جهت z در نتيجه اثر پو اسون، كرنش هاي كششي در جهت y ايجاد ميكنند. اين تركها مبين تركهاي فشاري وسون، كرنش هاي كششي در جهت y ايجاد



شكل6-48- نقاط انتكر الكيري المان بتن



شكل**6-49-** نمونه ترك

در موقعيت نشان داده شده در شكل (50-6c) تنشهاي كششي نرمال، در جهت x و تنشهاي برشي در صفحه x گسترش مييابند. در نتيجه جهت تنشهاي اصلي كششي از جهت افق متمايل ميشود. زماني كه تنشهاي كششي از جهت افق متمايل ميشود. زماني كه تنشهاي كششي در مايد، دايره اي مورب به صورت خط راست عمود بر جهت تنشهاي اصلي در نقاط انتگر الگيري ظاهر ميشوند. اين دواير اشاره به ترکهاي كششي قطري دارند.



شكل**6-50-** نمونه تركهاي ايجاد شده در مدل المان محدود تير (2-U90**): a)** تركهاي خمشي, b) تركهاي فشاري, c) تركهاي قطري كششي

به طور كلي در تيرهاي مدل، ابتدا تركهاي خمشي در وسط دهانه تير ظاهر شدند, سپس با افزايش بار، تركهاي خمشي عمودي به صورت افقي از وسط دهانه به سمت تكيهگاهها گسترش يافتند و در بارهاي اعمالي بالاتر، تركهاي قطري به وجود آمدند. و در نهايت افزايش بار وارده تركهاي خمشي و قطري اضافي را القاء نمود كه منجر به شكست تير شد. شكل (6-51)گسترش تركها در تير (2-10) را نشان ميدهد.

FRP- بررسى اثر زاويه الياف بر روي مقاومت برشى تيرهاي تقويت شده با

يكي از مهمترين پار امتر هاي اثر گذار در تقويت اعضاء ساز هاي با تركيبات پليمري FRP، زاويه الياف نسبت به محور طولي تير ميباشد. بر اين اساس به منظور بررسي اثر اين پار امتر در تقويت برشي تير ها از دو تير مقاوم شده با صفحات ممتد CFRP به صورت پوشش U شكل مشابه شكل (6-25) و با زاويه الياف ⁶4± (135-44) و ^{°0}و (190) بهر ه گرفته شد. مطابق نمودار هاي بار-تغيير مكان حاصل از نتايج آناليز المان محدود (شكل (6-53)) مشاهده مي شود كه حداكثر بهر موري زماني حاصل ميگر دد كه جهت الياف عمود بر امتداد تركخور دگي باشد. به عبارت ديگر, نمونه مقاوم شده با زاويه الياف مقاومت بر مي اين مودار مرومي بر مونه تير دارد. جدول (6-55) مقايسه نتايج حاصل نشان ميدهد.



شکل**6-51-** گسترش ترکها در تیر (U90-2)



شكل**52-6-** مدل هندسي تير هاي U45-135 و U90



شكل**6-53-** نمودار بار - تغيير مكان تير هاي كنترل, U45-135 و U90

ر اساس نتایج ANSYS	U45-13 و U90 بر	تير هاي کنترل	بار نهایی	-5-6 مقایسه ب	جدول
--------------------	-----------------	---------------	-----------	----------------------	------

تير	تغبير مکان نهايي mm	بار نهايي kN	درصد افزايش مقاومت برشي نسبت به تير كنترل(%)
كنترل	٨/•٢١	1.9/80	-
U45-135	٩/۴٨١	۱۹۳	۸١/۶۵

U90	18/0808	١٨.	÷9/417
-----	---------	-----	--------

6-3-5-1- گىىترش تركھا

شكل**(54-6)** گسترش تركها در تير ₁35-U45 را در مقايسه با تير مقاوم نشده نشان ميدهد. خطهاي قرمز رنگ تركهاي اوليه و خطهاي مشخص شده با رنگ سبز و آبي بازشدگي بيشتر ترك را مشخص مىكنند.

همانطور كه ملاحظه ميشود تركها در تير مقاوم نشده از گسترش بيشتري نسبت به تير مقاوم شده برخوردارند.





ب-تير U45-135

شكل**6-54-** گسترش تركھا

4-5-6- بررسي اثر الكوهاي مختلف تقويتي بر مقاومسازي برشي

به منظور بررسي اثر اين پارامتر, از سه تير مقاومشده با ورقهاي FRP با الگوي دورپيچ كامل, مطابق شكل (6-55 الف), با عنوان تير (w45/135)، الكوي تقويتي روي وجوه جانبي تير (845/135) مطابق با شکل (55-69ب) و تیر U45/145، بهره گرفته شد. در همه نمونه ها سیستم FRP از نوع f و با زاویه الیاف °**45±** مورد استفاده قرار گرفت.



(الف)



(ب)

شكل**6-55-** شكل هندسي ونحوه مشر ، مدي تير مقاومشده با الف) دور بيچ كامل FRP, ب)نصب روي دووجه جانبي

6-5-4-1- نمودار بار-تغيير مكان

شكل **(6-66)** نمودار بار-تغيير مكان تيرهاي مذكور را نشان ميدهد. همان گونه كه مشاهده مي شود تير مقاوم شده با دورپيچ كامل FRP، مؤثر ترين الكوي تقويتي است و تير مقاوم شده با نصب FRP روي وجوه جانبي كمترين تاثير را در افزايش مقاومت بر شي دارد. كه اين نتيجه مشابه نتايج به دست آمده از مطالعات آزمايشگاهي است. جدول **(6-6)** مقايسه بار هاي نهايي سه تير, با تير كنترل را نشان مي دهد.

تير	تغيير مکان نهايي mm	بار نهايي KN	درصد افز ايش مقاومت برشي نسبت به تير کنترل(%)
كنترل	٨/•٢١	1.9/80	-
W45-135	٧/٩٥٢	۲.,	۸۸/۲۴
U45-135	٩/۴٨١	۱۹۳	۸۱/۶۵
S45-135	١٣/٨٠٨	126/190	√٣/٣۶

جدول**6-6-** مقايسه بار نهايي تير هاي كنترل W45-135, W45-135, بر اساس نتايج ANSYS



شکل**6-56-** نمودار بار - تغییر مکان

FRP - 2-4-5-6 حطوط همتراز تنش در بتن و

در شکلهاي **(57-6)** تا **(62-6)** خطوط همتراز تنش در جهت محور طولي، در تير بتني و ورق FRP سه تير مذکور آورده شده است.







شکلFRP کانتور تنش در FRP در تیر 135-545



شکل**5-59-** کانتور تنش در بتن در تیر W45-135



شکل **60-6-** کانتور تنش در FRP در تیر 135-W45



شکل61-65- کانتور تنش در بتن در تیر 135-U45



شکل62-6 کانتور تنش در FRP در تیر 135-U45

همچنان كه ملاحظه ميگردد، ماكزيمم تنش در تير مقاوم شده با دورپيچ كامل نسبت به دو نمونه ديگر كمتر و گسترش آن نيز يكنواختتر است. همچنين تنشهاي موجود در FRP و بتن در تير مقاوم شده با نصب FRP روي وجوه جانبي(S45-135) بيشترين مقدار را نسبت به دو تير ديگر دارد، كه اين بيانگر اثر كمتر اين نوع الگوي مقاومسازي بر افزايش تقويت برشي، نسبت به دو الگوي ديگر است.

FRP - بررسي اثر دهانه برشي بر تقويت برشي تيرهاي مقاومشده با

همچنان که در فصل سوم اشاره شد، نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر () از پار امتر هايي است که در تأمين تقويت برشي توسط FRP، مؤثر است. علير غم اهميت اين پار امتر مطالعات اندکي در اين مورد به به ير در خصوص نسبتهاي کم , (2.5 >), انجام شده است. لذا در اين تحقيق، اثر اين عامل بر مقاومسازي برشي تير ها با استفاده از نرمافزار ANSYS مورد بررسي قرار گرفت. به اين منظور ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق مقاومسازي نير مقاوم نشده با استفاده از نرمافزار CFRP مورد بررسي قرار گرفت. به اين منظور ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي شدند. سپس، از يک لايه ورق ابتدا دو تير مقاوم نشده با نسبت دهانه برشي 1 = 2 و 2 = 2 مدلسازي نير دو مين از يک لايه ورق ابتدا دو تير مانازي تير ها استفاده شد. به دليل تغيير ابتدا دو تير ماير بار، مش بندي مدلها در دو نمونه متفاوت بود. براي مقاومسازي تير ها استفاده شد. به دليل تغيير محل اثر بار، مش بندي مدلها در دو نمونه متفاوت بود. براي مقايسه بهتر، دو نمونه با تعداد محل المانهايي برابر با المانهاي تير مبنا2، مش بندي شدند. مدل هندسي و نحوه مش بندي دو تير در شمول المانهاي تير نشان داده شده است.



شكل**63-64-** مدل هندسي تير با دهانه برشي a/d=2 شكل**64-64-** مشبندي تير با دهانه برشي a/d=2



شكلa/d=2 شكل هندسي تير با دهانه برشي a/d=2 مقاومشده با FRP



شكل**67-6-** مشبندي تير با دهانه برشي a/d=1

شكل**66-6-** شكل هندسي تير با دهانه برشي a/d=1



شکلa/d=1 شکل هندسی تیر با دهانه برشی a/d=1 مقاومشده با FRP

6-5-5-1- نمودار بار-تغيير مكان

نمودار بار-تغيير مكان تير هاي با دهان **ه اي** برشي متفاوت در اشكال (69-6)، (70-6) و (71-6) نشان داده شده است. همان طور كه ملاحظه مي گردد, هر چه محل اثر بار به تكيه گاه نزديك تر مي شود يا به اصطلاح نسبت دهانه برشي كاهش مي يابد, از اثر FRP در تأمين تقويت برشي تير ها كاسته مي شود. با توجه به نتايج به دست آمده از تحليل عددي مشخص شد, كه درصد افز ايش مقاومت برشي در تير با نسبت دهانه برشي 3 = ^{[3}/₂]، پس از مقاوم سازي با FRP، 64/95 درصد، در تير با نسبت دهانه برشي به عمق مؤثر 2 = ^{[3}/₂]، 28 درصد و در تير با نسبت دهانه برشي، 1 = ^{[3}/₂]، تنها 5 درصد، است.



شكل**6-66-** نمودار بار – تغيير مكان تير با دهانه برشي a/d=1





شكلa/d=3- نمودار بار - تغيير مكان تير با دهانه برشي a/d=3(تير 135-4/

FRP- ارزيابي اثر ميلگردهاي برشي بر مقاومسازي برشي تيرها با

براي ارزيابي اثر اين پارامتر ، از نمونه فاقد ميلگردهاي برشي استفاده شد. به اين منظور ابتدا تير مقاومنشده به عنوان تير کنترل, بدون در نظر گرفتن آرماتور هاي برشي, مدلسازي و سپس اين تير با ورق CFRP به صورت پوشش u شکل مقاوم شد.

مطابق نمودار بار-تغيير مكان به دست آمده از نتايج آناليز المان محدود نشان داده شده در شكل (6-72), با حذف ميلگردهاي عرضي، اثر FRP در تأمين مقاومت برشي افزايش مييابد.



شكل72-6- شكل هندسي ونحوه مشرب نمدي تير فاقد ميلكردهاي برشي

بر اساس نتايج حاصل(شكل(6-73))، ميزان افزايش مقاومت برشي تير مقاومشده با ورق CFRP در مقايسه با تير مقاومنشده در نمونه فاقد آرماتور برشي 83/08 درصد مشاهده شد، در حاليكه اين مقدار براي تير داراي ميلگردهاي عرضي با شرايط مشابه سيستم مقاومسازي برابر 64/96 درصد اندازهگيري گرديد. نتايج آزمايشهاي انجام شده در اين مورد نيز همين مطلب را خاطر نشان ميكند.



شكل73-6 نمودار بار - تغيير مكان تير فاقد أرماتور عرضي

فصل هفتم

نتيجه گيري و پيشنهاد

1-7- پیشگفتار

در تحقيق حاضر، كاربرد مواد مركب پليمري جهت تعمير و تقويت تيرهاي بتنآرمه مورد بررسي قرار گرفت. تيرهاي بتني تقويتشده با اين روش از ديدگاههاي گوناگوني ميتوانند مطالعه شوند. موضوع مورد نظر در اين تحقيق بررسي افزايش ظرفيت برشي تيرهاي بتنآرمه تقويت شده با سيستم FRP توسط روش اجزاء محدود بوده است.

2-7- مشخصات مدلها

در اين مطالعه، ابتدا تحليل عددي نمونه تير بتني مقاومشده در برش مربوط به آزمايش نوريس، سعادتمنش و احساني، توسط نرمافزار ANSYS ارزيابي شد. مقايسه نتايج هماهنگي خوبي را بين دادههاي آزمايشگاهي و تحليل عددي نشان داد. سپس با استفاده از چند مدل عددي، پارامتر هايي همچون، اثر ضخامت FRP، زاويه الياف، نوع الگوي تقويتي، دهانه برشي و اثر ميلگردهاي عرضي در تقويت برشي تير هاي بتنآرمه تقويت شده مورد بررسي قرارگرفت. مشخصات مربوط به نحوه مقاومسازي هر يک از اين نمونه ها در جدول (1-1) ارائه شده است.

3-7- نتيجەگىرى

با مقايسه نتايج حاصل از تحليل عددي هر يک از نمونههاي معرفي شده در جدول **(1-7)**، نتايج زير حاصل گرديد.

1- با افز ايش ضخامت FRP، ميز ان مقاومت برشي تأمين شده توسط FRP افز ايش مييابد. مطابق نمودار هاي بار- تغيير مكان بدست آمده، در صد افز ايش مقاومت برشي براي سه تير مقاوم شده با FRP با ضخامت هاي 0/546، 1/092 و 2/186 ميليمتر، مطابق شكل (7-1) مي باشد.

عنوان تير	شخصات ورقه FRP	پارامترهاي مورد مطالعه	
U90-1	پوشش U شکل با زاویه الیاف °۹۰	$t_{FRP} = \cdot / \Delta $	
U90-2	پوشش U شکل با زاویه الیاف °۹۰	$t_{FRP} = 1/\cdot 97$	ضخامت FRP
U90-3	پوشش U شکل با زاویه الیاف °۹۰	$t_{FRP} = 7/1 \Lambda \hat{\tau}$	
U45-135	پوشش U شىكل	$\propto = \pm {}^{\varphi} {}^{\diamond}$	
U90	پوشش U شکل	∝=۹۰°	ر او یه الیاف
W45-135	دور پيچ کامل		
U45-135	پوشش U شكل	الكوي تقويتي	
S45-135	FRI روي وجوه جانبي نير		
(تیر مقاوم نشده) $rac{b}{a}=1$ (تیر مقاوم نشده) $rac{a}{b}=1$) شكل با زاويه الباف 45 <u>+</u>	ພ້າມປາໄລາ	
$(2 = \frac{a}{d}) = (2$ تیر مقاوم نشده) $(2 = \frac{a}{d}) = (2$ (تیر مقاوم شده)	J شكل با زاويه الياف 4 <u>5±</u>	لمت برسي	

جدول1-7- مشخصات مدلها



شكل-1-7 درصد افزايش مقاومت برشي براي سه تير مقاوم شده با ضخامت متفاوت

- 2- كرنش كششي در ميلگردهاي فولادي كششي با بهبود ضخامت FRP، به علت محدود شدن گسترش و بازشدگي تركها، كاهش مييابد، اما اين ميزان كاهش بسيار ناچيز است.
 - **3-** ورق هاي FRP، با زاويه الياف 45± درجه نسبت به ورق هاي با زاويه الياف **90** درجه اثر بيشتري در بهبود مقاومت برشي تير هاي مقاوم شده با پوشش U شكل در تير هاي داراي نقص برشي دارند.



شكل**2-7-** درصد افزايش مقاومت برشي در تيرهاي U45-135 و U90

4- الكوي دورپيچ كامل FRP، مؤثرترين الكوي تقويتي است و نصب FRP روي وجوه جانبي تير كمترين تاثير را در افزايش مقاومت برشي دارد. درصد افزايش مقاومت برشي در هر يك از سه الكوي معرفي شده در جدول(1-7) مطابق نمودار ميلهاي زير مي باشد.



شكل**3-7.** درصد افزايش مقاومت برشى در الگوهاي متفاوت مقاومسازي

5- هر چه محل اثر بار به تكيهگاه نزديكتر شود و يا به اصطلاح نسبت دهانه برشي كاهش يابد, از اثر FRP در تأمين تقويت برشي تير ها كاسته ميشود. درصد افزايش مقاومت برشي در مدل هاي با دهانه برشي 3= ﷺ و 1= ﷺ مطابق نمودار زير ميباشد.



شكل 4-7- درصد افزايش مقاومت برشي در مدل هاي با دهانه برشي متفاوت

6- اثر FRP در نمونه فاقد آرماتور برشي بسيار بيشتر از مدل مشابه داراي آرماتور هاي عرضي است. درصد افزايش تقويت برشي تأمينشده توسط FRP در دو تير مذكور مطابق نمودار به ترتيب برابر 64/95 و 83/08 مي باشد.



شكل **5-7-** درصد افز ايش مقاومت برشي در مدل فاقد آرماتور برشي

4-7- پیشنهادات

همانطور كه قبلاً نيز بدان اشاره شد, استفاده از تركيبات پليمري براي مقاومسازي تيرها و دالها در خمش ونيز تقويت اعضاي فشاري موضوعاتي هستند كه تاكنون بهخوبي به آنها پرداخته شده است, ليكن عليرغم تحقيقات مناسب در اين زمينهها, مقاومسازي برشي تيرها با استفاده از تركيبات پليمري هنوزتحت بررسي بوده و نتايج بهدست آمده تاكنون كم و گاهي محافظهكارانهاند. لذا جهت انجام مطالعات تكميلي پيشنهادات زير ارائه ميگردد:

- **1-** بررسي الگوهاي مختلف مقاومسازي با استفاده از نوارهاي مجزاي FRP, به دليل صرفهجويي بيشتر در مصرف آن, در ادامه مطالعات ضروري ميباشد.
- 2- انجام مطالعات دقيقتر بر روي پارامترهايي همچون نسبت آرماتورهاي عرضي, جهت زاويه الياف, ارزيابي اثر آرماتورهاي طولي, نوع سيستم FRP و نيز مقاومت فشاري بتن در مقاومسازي برشي لازم است.
- 3- مدلسازي چسب به منظور بررسي ساير مدهاي گسيختگي نظير جداشدن FRP از سطح تير از جمله مواردي است كه پرداختن به آن ميتواند به درك بهتر رفتار سازه مقاومشده با اين روش بيانجامد.



در این پیوست سعي شده است تا با مرور موضوعات عمومي در به کار گیري نرم افزار ANSYS، نحوه مدلسازي و آناليز سازهاي بررسي شود.

مراحل آنالیز در برنامه <u>ANSYS</u>

- انتخاب روش حل و نوع آناليز

h method /Structural/ANSYS Main Menu/Preferences

در نرمافزار ANSYS كليه تحليلها اعم از سازهاي, مغناطيسي, الكتريكي, حرارتي, سيالاتي و ... موجود است كه بنا به نوع مسأله انتخاب مي شود. پس از انتخاب نوع تحليل در اين قسمت روش حل تعيين مي گردد. به طور كلي در اجزاي محدود 2 روش حل وجود دارد كه عبارتند از:

h-Method-

P-Method-

در روش h-Method از المانهای خطی و درجه 2 و در روش P-Method از المانهای غیرخطی درجه 3 به بالا استفاده می شود. استفاده از المانهای غیرخطی با درجات بالاتر اگرچه دقت محاسبات را بالا می برد ولی در افزایش سرعت روند حل، تأثیر چشمگیری دارد, لذا اکثر نرمافزارهای موجود اجزای محدود از روش ریزکردن h-Method استفاده میکنند. در این روش ابتدا شبکهبندی بر اساس دقت مورد نظر در محاسبات با المانهای خطی و یا حداکثر سهموی و از درجه 2 در نظر گرفته شده و پس از تحلیل و ارزیابی نتایج, در صورت لزوم برای افزایش دقت, شبکهبندی اصلاح می شود. حسن این روش کاهش چشمگیر سرعت حل در محاسبات و سادگی روش حل است.

- انتخاب سيستم آحاد مناسب

Preprocessor/ Material Properties / Material library /Select Units / SI

در نرمافزار ANSYS ميتوان واحدهاي مختلف نظير سيستم انگليسي و سيستم متريك را تعريف كرد. انتخاب هر يك از اين سيستم**ه J** تأثيري در نحوه انجام محاسبات و پاسخ مسأله ندارد.

- انتخاب نوع المان

Preprocessor / Element Type

با توجه به مسأله مورد نظر و نوع تحليل، براي توليد شبكه انواع المانها با كاربرد مختلف مورد استفاده قرار ميگيرند. به عنوان مثال در يک مسأله تنش مسطح، برای کاهش حجم محاسبات بايستی از المانهای غشايی استفاده شود.

در این پایاننامه برای بتن در حالت **3** بعدی از المان حجمی Solid65 با قابلیت مدل کردن ترکخوردگی و خردشدگی برای مدل کردن آرماتور از المان های میلهای با **3** درجه آزادی انتقالی Link8 و برای مدل کردن CFRP از المان حجمی با قابلیت چند لایه بودن Solid46 استفاده شد.

- تعيين ثوابت حقيقى المان

Preprocessor / Real Constants

برخي از المانها نياز به تعريف يك سري مقادير ثابت دارند به عنوان مثال براى المان Link8 تعريف سطح مقطع انواع آرماتور به كار رفته ضروري است.

- تعریف خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد

Preprocessor / Material Properties / Material Models

براي تحليل بايد خواص ماده المان هاي ريخته شده روي مدل را مشخص نمود. به طور معمول اين خواص شامل جنس و خصوصيات مكانيكي و حرارتي آن ميباشد.

- مدل کردن هندسه مسأله ومعرفی ابعاد

Preprocessor / modeling / Create

مدل هندسي مسأله را ميتوان به كمك قابليتهاي مدلسازي هندسي نرمافزار ANSYS ايجاد نمود. همچنين ميتوان مدل را در نرمافزارهاي CAD نظير AutoCAD در قالب فايل IGES.* ساخته و وارد نرمافزار كرد. ميتوان از شرايط تقارن براي مدل كردن هندسه مسأله و يا اعمال قيود وشرايط تكيهگاهي براي كاهش حجم محاسبات بهره جست.

- تخصیص مشخصات و شبکهبندی

دراين مرحله ابتدا به هندسه موردنظر, المان مناسب, مشخصات خاص المان, ثابت حقيقي مربوط و مدل رفتاری مناسب اختصاص داده میشود. سپس شبکهبندی مدل با استفاده از شبکهبندی اختياري **و** يا ترسيمی انجام میگردد. در يک تحليل غير خطی بهتر است نسبت ابعاد مش از 2 يا 3 تجاوز نکند. در زير بار متمرکز وروی تکيه گاهها برای جلوگيری از تمرکز تنش توصيه میشود از شبکهبندی ريز تري استفاده شود.

- اعمال شرایط مرزی شامل بارهای وارده و قیود تکیهگاهی

به طور كلى بارهاى وارد به سازه را مىتوان به صورت نيروها و لنگرهاى متمركز يا گسترده, كششها وفشارهاى سطحى(غشايي), بارهاى حرارتى, بارهاى حجمى ناشى از تأثير يک ميدان گرانشى يا حتى الكترومغناطيسى و ... در نظر گرفت. قيود تكيهگاهى را نيز با بستن درجات آزادى مورد نظر گرهها در محل تكيهگاه مىتوان اعمال نمود.

- انتخاب نوع آناليز

برنامه ANSYS قابلیت انجام انواع تحلیل**ہ /** نظیر استاتیکی, مودال, هارمونیک, گذارا, طیفی, کمانشی و تحلیلهای زیر سازهای را دارا است.

- تنظیم پارامتر های حل غیر خطی و انتخاب معیار همگرایی (Convergence Criteria):

در اين مرحله تعداد مراحل بارگذاری(Load Step), زيرگامها(Sub Step) گامهای زماني Time) (Step, تعداد حداکثر تکرار در هر زيرگام, پارامتر همگرايي (نيرو, تغيير مکان, لنگر و يا چرخش) ونتايج دلخواه در هر زير گام انتخاب میشود.

- آشنايي با مراحل بارگذاري و Loadstep and substep در Ժ غير خطي

به منظور در نظر گرفتن بارگذاری استاتیکی تدریجی و نموی (Monotonic) درحل غیر خطی لازم است روند بارگذاری تا رسیدن به بار نهایی یکنواخت رشد نکند به عبارت دیگر به دلیل عدم ترک خوردگی عضو بتن آرمه در اوایل بارگذاری و در ناحیه تقریباً خطی چون با افزایش اندک بار افزایش اندک تغییر شکل را به دنبال خواهد داشت, بنابراین در این ناحیه می توان از نمو و رشد بارگذاری سریعتر و تعداد Sub step کمتری استفاده کرد. در ناحیه غیر خطی وپس از وقوع ترکهای ثانویه (ترکهای برشی- خمشی) با افزایش اندک بار , افزایش زیاد تغییر شکل را به دنبال خواهد داشت بنابراین برای جلوگیری از واگرایی در حل لازم است در این ناحیه برعکس مراحل اولیه بارگذاری از نمو و رشد بارگذاری کندتر استفاده شود(شکل۴-۱)). بنابراین می توان گفت, حل مسائل پلاستیسیته و غیرخطی تابعی از مسیر و تاریخچه بارگذاری است.



(۱-۴) مراحل اعمال گامهای بارگذاری

- بدست آوردن نتایج در محیط پس پردارش Post1 وPost26 وPost2

در محیط(post1) post Processing می توان نتایج دلخواه را خواند و به صورت Plot یا list بسته به مورد, ذخیره کرد. معمولاً برنامه اکثر نتایج اصلی و فرعی(Primary &Derived Data) مربوط به هر المان وگره های آن اعم از تغییر شکلها, تنش و کرنش در هر جهت (جهات اصلی و کلی) را می دهد تنها در مورد برخی از المانها چون Link8 برخی از نتا یج چون تنش تسلیم را پس از تعریف نتیجه مورد نظر می توان در محیط Element table آن را رؤیت کرد. در برنامه ANSYS می توان ترک خوردگی و خردشدگی بتن را نیز مشاهده نمود.

در محیط (Post26) Time History میتوان نتایج مربوط به یک المان یا گرهای از آن را در تمامی زیر گامها مشاهده کرد.

در انتها نیز می توان نتایج آنالیز را به صورت لیست یا گراف دریک زیرگام یا یک مرحله بارگذاری و یا تمامی مراحل وزیرگامهای بارگذاری استخراج کرد.

منابع و مؤاخذ

- [1] ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, 2000, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [2] Bank, L., 1956, "Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials".
- [**3**] Nanni1,A., Lopez, A. "Validation of FRP composite technology trhough field testing" UMR, Rolla, Missouri, USA.
- [**4**] Hollaway.L.C , 2001, "Advanced polymer composites and polymer in the civil in frastracture", Elsevier Science direct.

[5] ثابت ، سيد عليرضا, 1378, "الياف به عنوان تقويت كننده " پژو هشگاه پليمر ايران.

- [**6**] Smith, S.T., Teng, J.G., 2002, "FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models." Engineering Structures, Vol.24, Num.4, pp. 385-395.
- [7] Teng, J.G. Chen, J.F. Smith, S.T. lam, L., 2004, "FRP Strengthened RC Structures.", Polymer International, Vol.53, Num.2, pp. 232-233.
- [**8**] Hedong, N., Zhishen, Wu., 2002 "Analytical modeling on debonding failure of FRP strengthened RC Flexural structures.", Ibaraki Universiy, Hitachi, Japan.
- [9] Uji, K., 1992, "improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheets." Transactions of the Japan concrete institute. Vol. 14, pp.253-266.
- [10] Alagusundaramoorthy, P., Harik, I.E. and Choo, C.C., August 2002, "Shear strengthening of R/C beams wrapped with CFRP fabric", Research report KTC-02-14/SPR 200-99-2F; University of Kentucky, Kentucky transportation center.

[**11**] کي نيا، امير مسعود، "آناليز وطراحي سازه هاي بتن آرمه"، (چاپ نهم، انتشارات جهاد دانشگاهي واحد صنعتي اصفهان)

- [12] Schnerch, D.A., 2001, "Shear behavior of large-scale concrete beams strengthened with fiberreinforced polymer (FRP) sheets", A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of science, Department of civil Engineering Faculty of Engineering University of Manitoba.
- [**13**] Adhikary,B.B.,Mutsuyoshi,H., march2006, "Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques" Construction and Building Materials, Vol.20, Num.6, pp.366-373.
- [14] Khalifa, K., Tumialan, G., Nanni, A., Belarbi, A., 1999, "Shear strengthening of continuous reinforced concrete beams using externallybonded carbon fiber reinforced polymer sheets." Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforced for Concrete Structures. Edited by Charles W. Dolan. ACI, Farmington Hills, Michigan. 995-1008.
- [10] Chaallal, O. Shahawy, M. Hassan, M., 2002, "Performance of Reinforced Concrete T-Girders Strengthened in Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Fabrics," ACI Structural Journal, Vol.99, No.3, pp.335-343.
- [16] Araki, N., Matsuzaki, Y., Nakano, K., Kataoka, T., Fukuyama, H.,1997, "Shear capacity of retrofitted RC members with continuous fiber sheets." Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, vol. 1. Published by Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan. 515-522.
- [17] Alagusundaramoorthy, P., Harik, I.E. and Choo, C.C., August 2002, "Shear strengthening of R/C beams wrapped with CFRP fabric", Research report KTC-02-14/SPR 200-99-2F; University of Kentucky, Kentucky transportation center.
- [1A] Taerwe, L., Khalil, H., Matthys, S., 1997, "Behaviour of RC Beams Strengthened in shear by external CFRP sheets." Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, vol. 1. Published by Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan. 483-490.
- [19] Chajes, M., J., Januszka, T., F., Mertz, D., R., Thomson, T., A., Finch, W., W., 1995, "Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics." ACI Structural Journal. 92(3) May-June, 295-303.
- [7.] Mahini, Seyed Saeed., December 2004, "Rehabilitation of exterior RC Beams-Column joints using web-bonded FRP sheets." PHD Thesis, University of Queensland.
- [71] Bousselham, A., Chaallal, O., March-April 2004, "Shear strengthening reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer: assessment of influencing parameters and required research" ACI structural journal, V.101, No.2.
- [22] Elyasian, I., Abdoli, N., and Ronagh, H.R., 2006, " Evaluation of Parameters effective in FRP shear strengthening of RC Beams using FE Method." Asian Journal of Civil Engineering(Bulding and Housing) Vol.7, No.3, pp249-257.

- [**23**] Chen, JF., Teng, JC., 2003, "Shear capacity of Fiber Reinforced Polymer-strengthened Reinforced Concrete beams: FRP rupture." J Struct Eng ASCE 129(5) 615-625.
- [Y*]Triantafillou, T.C., 1998, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites," ACI Structural Journal. 95(2) March-April, 107-115.
- [**25**] Sebastian, W.M., 2001, "Significance of midspan debonding failure in FRP-Plated concrete beams", Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.127, No.7, pp.792-798.
- [**26**] Veccho, F. Wong, R.S.Y., 2003, "Towards modeling of Reinforced concrete members with externally bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites", ACI Structural Journal, Vol.100, No.1, pp.47-56.
- [YY] Arduini, M. Nanni, A., 2003, "Parametric study of beams with externally bonded FRP Reinforcement", ACI Structural Journal, Vol.94, No.5, pp.493-501.
- [**28**] Chen, J.F. Teng, J.G.,2001, "Anchorage strength models for FRP and Steel Plates bonded", Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.127, No.7, pp.784-791.
- [**29**] Hiroyuki, Y. and Wu, Z., 1997, "Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened member subject to tension", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for concrete structures, Sapporo, japan, pp.287-294.
- [**30**] Mosallam, A. S. Banerjee, S., 2007, "Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates", Science Direct, Composites: Part B 38, pp. 781–793.
- [**37**] Carolin, A. Taljsten, B., 2003, "Theoretical Study on Strengthening for increased Shear bearing capacity", thesis of doctoral, Lulea University technology, Sweden.
- [°7] Wenjie, Z., 2003, "Shear Strength of Concrete Beams with Web Bonded FRP", Ph.D., Department of Civil and Architectural Engineering.
- [**33**] Vecchio, F.J. and Collins, M.P.,1986, "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced-Concrete Elements Subjected to Shear". Journal of the American Concrete Institute, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 219-231.
- [34] Qu, Z. Lu, X.Z. Ping Ye, L. Chen, J.F. Rotter, J.M., 2006, "Numerical Modeling of Shear strengthened R.C Beams using Compression Field Theory", International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), Miami, Florida, USA, pp.391-394.
- [35].Chaallal, O., Nollet, M. J., and Perraton, D., 1998, "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fibre-reinforced-plastic plates: Design guidelines for shear and flexure." Can. J. Civ. Eng., 25(4), 692–704.
- [**36**] Triantafillou, T. C., 1998, "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy bonded FRP composites." ACI Structural Journal., 95(2), 107–115.
- [**37**] Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., and Aziz, A. 1998, "Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members." J. Compos. Constr., 2(4), pp.195–202.

- [\[TA] Maeda, T. Asano, Y. Sato, Y. Ueda, T. and Kakuta, Y., 1997, "A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet," Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium, Vol.1, pp.279-286, Japan.
- [**39**] Triantafillou T.C., Antonopoulos C.P., 2000, "Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP." J Compos Construct, ASCE;4(4), pp.198–205.
- [**40**] Chen, J.F., and Teng, J.G., 2003, "Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete beams: FRP rupture." J Struct Eng ASCE 129(5) pp.615-625.
- [41] Chen, J.F., and Teng, J.G., 2003, "Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding." Constr. Build. Mater., 17(1), pp.27–41.
- [42] Matthys S., and Triantafillou T.C., 2001, "Shear and torsion strengthening with externally bonded FRP reinforcement. In: Reality A, Cosenza E, Manfredi G, Nanni N, editors. Proceedings of the international workshop on composite in construction, Capri, Italy, pp. 203–10.
- [43] Colotti, V. Spadea, G. and Swamy, R.N., 2004, "Analytical model to evaluate failure behavior of plated reinforced concrete beams strengthened for shear." ACI Structural Journal, Vol.101, No.6, pp.755–764.

[44] سازمان مدیریت و برنامهریزی کشور, 1385, "راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمانهای بتني موجود با استفاده از مصالح تقوبتي FRP " نشر به شمار ه **345.**

[45] جاهد مطلق. حميدرضا، نوبان. محمدرضا و اشراقي. محمدامين، 1383، "اجزاء محدود(ANSYS) " چاپ دوم انتشارات دانشگاه تهران.

[46] شعبانعلي, محمدر ضا., 1382, "تحليل المان محدود به كمك ANSYS." ويرايش دوم

- [47] Arduini, M. Di Tommaso, A. and Nanni, A., 1997, "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams." ACI Structural Journal, Vol.94, No.4, pp.367-370
- [48] Tedesco, J.W. Stallings, J.M. and El-Mihilmy, M., 1999. "Finite Element Method Analysis of a Concrete Bridge Repaired with Fiber Reinforced Plastic Laminates." Computers and Structures, 72, pp.379-407.
- [۴٩] Kachlakev, D., 2001, "Finite Element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates." California Polytechnic University, San Luis obispo, Final Report for Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration.
- [**50**] Norris, T. Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R., 1997 "Shear and FlexuralStrengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets." Journal of Structural Engineering, Vol.123, No.7, pp.903-911
- [51] ANSYS Help-Version9
- [**52**] Bangash, M.Y.H., 1989, "Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications", Elsevier Science Publishers Ltd., London, England.
- [**53**] ACI 318-99, American Concrete Institute, 1999, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [**54**] Desayi, P. and Krishnan, S., 1964, "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete," Journal of theAmerican Concrete Institute, 61, pp. 345-350.
- [**55**] Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., 1997, "Mechanics of Materials", PWS Publishing Company, Boston, Massachusetts.

[**56**] صبوري، هادي. **1382,** "بررسي رفتار مودال اجزاء سازه اي تعمير وتقويت شده با استفاده از مواد مركب " پايان نامه كارشناسي ارشد دانشگاه فردوسي مشهد.

[57] تاتار، محمد، 1380, "تحليل غير خطي سازه براساس مسير ايستايي." پايان نامه كارشناسي ارشد، دانشگاه فردوسي مشهد.