تکنیکهای ایجاد شیار و جاسازی میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP جهت مقاوم سازی سازه‌های بتونی

حامد رجب پور،دانشجوی مهندسی عمران،دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند، عضو باشگاه پژوهشگران جوان
سپهر ساعدی ، کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی ، دانشگاه تبریز
رضا اللهیاری ، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند (آموزشکده سماء)
رضا سرکن دیزجی ، دانشجوی دکترای معماری ، دانشگاه معماری و عمران باکو

تلفکس : ۳۳۶۲۰۵۸ – ۰۴۱۱

hamed.Rajabpour@gmail.com
Sepsaedi@yahoo.com
Rzllhyr@yahoo.com
Resdizaji@yahoo.com

چکیده

برای بکارگیری تکنولوژی تقویت جدید، با استفاده از میله‌های پلیمر تقویت شدهٔ فیبرکربن با عملکرد بالا (CFRP) با مقطع عرضی ذوزنقه‌ای جهت تقویت تیرهای بتونی، یک برنامه آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. متد پیشنهاد شده در تقویت تیرهای بتونی ، دارای دو مزیت مهم است: حالت گسیختگی تیر، قبل از رسیدن گسیختگی‌های موضعی به گسیختگی‌های خمشی،کنترل شده و فرایند تقویت ساده و بکارگیری آن و تقویت تیرهای بتونی و اجزاء در تیر – ستون قدیمی، آسان است . تکنولوژی جدید بر اساس سیستمی پیشنهاد شده که در آن میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP مدوله شده به لحاظ هندسی با کمک اتصالات فلزی U شکل با کاربری بیرونی، جاسازی می‌شوند.با مقایسه نتایج روش پیشنهاد شده با نتایج آزمایشات تیرهای تقویت شده بطور متعارف ،مشخص می شود که روش پیشنهاد شده، ظرفیتهای شکل پذیری وحمل بار تیرهای بتونی را بخوبی بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ***CFRP ، قطعات فلزی، تقویت سازه‌های بتونی، ظرفیت حمل بار، شکل پذیری.***

۱. مقدمه :

با قدیمی شدن تأسیسات زیربنایی، گرایش به روشهای موثر جهت نوسازی سازه‌های بتونی افزایش یافته است. یکی از چالش برانگیزترین کارها در این زمینه، ارتقاء ظرفیت کلی مقاومت و انعطاف پذیری سازه-های بتونی، می‌باشد[۱] . اخیراً برای تقویت سازه‌های بتونی، عمدتاً از مصالح کامپوزیت بواسطهٔ مزایای آنها در عدم فرسودگی ، مقاومت زیاد در برابر مواد شیمیایی، نسبت مقاومت به وزن بالا و واکنش بهتر در مقابل خستگی و میرایی، استفاده شده است . مصالح FRP نسبت به سیستم‌های بازسازی جایگزین، سبک تر و مقاوم تر بوده و همگذاری آنها آسانتر است. آزمایشات نشان داده کهGFRP یا CFRP ،مقاومت و انعطاف پذیری بتون محسور را افزایش داده‌اند[۳،۲] . به هر حال، بخش عمدهٔ تحقیقاتی که از مصالح کامپوزیت استفاده کرده اند، بر افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتونی تقویت شده، متمرکز شده است.

تا کاهاشی و دیگران، استفاده از پوشش U شکل و ورقه‌های CFRP را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که این الگوی مقاوم سازی می‌تواند پیشرفت پوسته شدگی و گسیختگی ورقه‌های CFRP تغییر دهد[۴]. در مقاوم سازی تیرهای بتونی مسلح با پلیتهای فولادی یا ورقه‌های FRP ، مصالح مقاوم سازی بدلیل گسیختگی‌های موضعی زود هنگام از قبیل پوسته شدگی و گسستگی، کامپوزیت ها نمی‌تواند بسیج شده و مقاومت کششی لازم تامین کنند[۶،۵] .

در تحقیق حاضر، میله‌های CFRP با مقطع عرضی ذوزنقه‌ای به هنگام تقویت تیرهای بتونی مسلح فرسوده به عنوان مصالح مقاوم سازی انتخاب شده‌اند. مدول‌های الاستیک میله CFRP با مقطع عرضی ذوزنقه‌ای قابل مقایسه با میلگرد فولادی است که مزیت CFRP در نوسازی تیرهای بتونی مسلح می‌باشد چون اکثر مصالح FRP قابل دسترس، فقط یک پنجم به یک سوم ضریب الاستیک (ارتجاعی) فولاد، هستند. اساساً ، میله‌های FRP با مقطع عرضی مدور از لحاظ پژوهش تا حدودی بواسطهٔ مشکل مقاومت چسبندگی کافی بین میله‌های FRP و بتن شیاردار، چندان جلب توجه نکردند. با این وجود مقطع عرضی ذوزنقه‌ای در میله‌های CFRP برای مقایسه با میله‌های مدور و نوارهای مستطیلی با توجه به مزیت جلوگیری از گسیختگی‌های موضعی زود هنگام بتن بتون و میله‌های FRP ، پیشنهاد شده است. میله ذوزنقه‌ای CFRP در شیار کف تیر بتونی فرسود با سیستم اتصال دهندهٔ فلزی U شکل یا بدون آن ، جاسازی می‌شود. نتیجتاً با استفاده از تکنیک تقویت پیشنهاد شده، جلوگیری از گسیختگی تیرهای تقویت شده ،بواسطه کنترول گسیختگی موضعی قبل از تبدیل به گسیختگی خمشی و نیز فرآیند تقویت عملی ساده و بکارگیری آن در تیرهای بتونی مسلح فرسوده یا قطعات تیر ـ ستون ، آسان است.

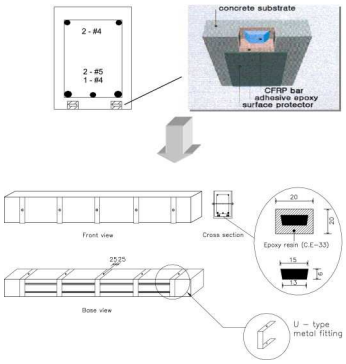
تحقیق حاضر، به ارائه تکنیک تقویت جدید از طریق جاسازی میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP با کارایی بالا در شیار بتون، پرداخته و کارایی تکنیک تقویت جدید را با استفاده از انجام آزمایشات بر روی تیرهای بتونی تقویت شده ، نشان می‌دهد. برای ارزیابی بهبود عملکرد تیرهای بتونی تقویت شده با سیستم تقویت جدید، آزمایشات خمشی بر روی چند تیر بتونی مسلح تقویت شده با استفاده از متد پیشنهاد شده و متدهای قراردادی، انجام شدند، مقایسات، بین تیرهای ترمیم شده از لحاظ شکل پذیری خمشی، ظرفیتهای حمل بار و حالتهای گسیختگی، انجام شده‌اند.

۲. تکنولوژی تقویت پیشنهاد شده :

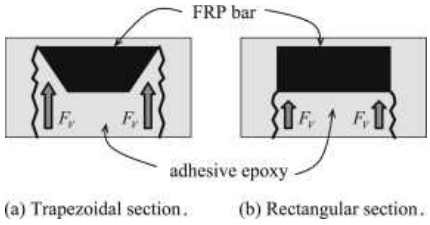
۲. ۱. سیستم کامپوزیت متشکل از میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP و اتصالات فلزی U شکل :

اساس روش پیشنها شده، جاسازی میله ذوزنقه‌ای CFRP در شیار ایجاد شده در کف تیربتونی با اتصال فلزی U شکل یا بدون آن، به منظور افزایش مقاومت چسبندگی بین بتون فرسوده و میله ذوزنقه‌ای CFRP می‌باشد همانطوریکه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود. یک میله CFRP با مقطع عرضی ذوزنقه‌ای در ضلع کوتاهتر رو به بیرون نصب می‌شود تا از لحاظ هندسی به بهبود یکپارچگی بین میله CFRP و بتن کمک

کند همانطوریکه در شکل ۲، نشان داده می‌شود. طبق شکل ۲، در مقاسه با مقطع عرضی مستطیلی، مقطع عرضی ذوزنقه‌ای در افزایش مقاومت در برابر گسستگی بتون F_V ، دارای مزیت است. گذشته از این ، طبق شکل ۱ انتظار می‌رود که مدولاسیون هندسی میله ذوزنقه‌ای CFRP با بکارگیری اتصالات فلزی، رفتار کامپوزیت تیرهای تقویت شده را بطور قابل توجهی بهبود داده و از گسستگی نامطلوب مقـــــاطع مقاوم سازی، جلوگیری می‌کند. بنابراین، بازسازی مداوم سازه‌های بتونی تقویت شدهٔ فرسوده، بطور بالقوه با بکارگیری تکنولوژی تقویت پیشنهاد شده، تحقق می‌یابد.



شکل (۱): *طرح مفهومی متد مقاوم سازی پیشنهاد شده*



شکل (۲) : *مکانیسم مقاومت بتن در مقابل گسستگی :*

(الف) برای مقطع عرضی ذوزنقه ای میله CFRP ، (ب) برای مقطع عرضی مستطیلی میله CFRP

۲. ۲. فرآیند ساخت :

۱- آماده سازی سطح: سطح بتون برای آسترزنی و پوشاندن با اپوکسی چسبنده، آماده می‌شود.

۲- کاربرد اپوکسی چسبنده: ترکیبات برای تشکیل رزین اپوکسی با هم مخلوط می‌شوند.

با استفاده از یک کاردک، شیار ایجاد شده در کف تیربتونی، پس از استعمال آستر، با اپوکسی پرمی‌شود.

۳- نصب میله‌های CFRP : میله ذوزنقه‌ای با ضلع کوتاه روبه بیرون در شیار قرارگرفته و چسبانده می‌شود.

۴- استفاده از محافظ سطح: محافظ سطح درکف مقطع مقاوم سازی استعمال می‌شود.

۵- استفاده از اتصالات فلزی U شکل: که در وسط و هر دو انتهای میله CFRP نصب می‌شوند.

۲. ۳. آماده سازی نمونه :

مجموعاً هفت تیر بتونی با مقاطع عرضی (۳۰۰ mm × ۲۰۰) مسلح مجزا مورد آزمایش واقع شد. این تیرها، طبق نوع مادهٔ تقویت کننده به پنج گروه متفاوت طبقه بندی شدند همچنانکه در جدول ۱، ارائه شده است.

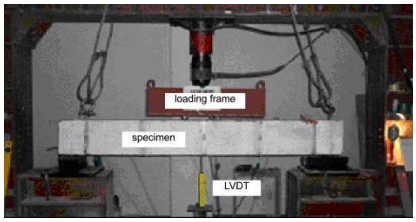
جدول(۱) : *طبقه بندی تیرها آزمایشی طبق نوع مادهٔ تقویت کننده .*

روش مقاوم سازی	نوع	نمونه
تیر بتونی مسلح بدون مادهٔ تقویت کننده	I	CS
پلیت فولادی پیچی (به ضخامت ۳ و عرض ۲۰۰ mm) بدون اتصالات فلزی U شکل	II	SP
یک لایه پلیت CFRP (به عرض ۱۰۰ mm)	III	CP
دو لایه ورقه CFRP (به عرض ۲۰۰ mm)	IV	CS2
تیربتونی مسلح مقاوم سازی شده با ۱ میله ذوزنقه‌ای CFRP	V	CB1
تیربتونی مسلح مقاوم سازی شده با ۲ میله ذوزنقه‌ای CFRP		CB2
تیربتونی مسلح مقاوم سازی شده با ۲ میله ذوزنقه‌ای CFRP و اتصالات فلزی U شکل		CB2U

نمونه I تیر کنترل بوده و یک تیر بتونی مسلح منظم طراحی شده برای گسیختگی در خمش طبق آیین نامه ساختمانی ACI ۳۱۸ سال ۲۰۰۲ ، بدون تقویت بود ،که با حالت تحت تقویت مطابقت داشت. انواع تیر IV, III, II با طرحهای تقویت فولادی مشابه نوع I ساخته شدند و طبق جدول فوق مقاوم سازی شدند. نمونهV، تیربتونی مسلح مقاوم سازی شده با میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP را نشان می‌دهد. نمونه‌های CB1وCB2 طبق متد مقاوم سازی پیشنهاد شده ، طراحی شدند اما نمونه CB2U با دو میله CFRP و اتصالات فلزی U شکل ترکیب شد. همهٔ تیرها ، تقویت برشی متراکمی را دارا هستند تا مقاومت برش کافی را فراهم نمایند.

۳. روش آزمایش :

تیرها در معرض بار خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفتند(شکل ۳). سه مبدل نسبی متغیر خطی LVDTs روی چارچوب زیرین، برای کنترلب انحراف نصب شدند و ده کرنش سنج به میله‌های فولادی، قطعات سازه‌ای تقویت کننده و بتون در سطح فشاری تیرها، متصل شدند. طی آزمایش بار اعمال شده، جابجایی‌ها و کرنش‌ها از طریق سیستم اکتساب داده‌ها کنترل شدند. همهٔ نمونه‌ها با روش مرحله‌ای تحت کنترل بار تا تسلیم میلگرد فولادی کشش اصلی و سپس تحت کنترل جابجای تا گسیختگی ، بارگذاری شدند. ترکهای موجود در بتون علامتگذاری شده و پهنای ترکها در هر مرحله از بارگذاری اندازه‌گیری شدند.

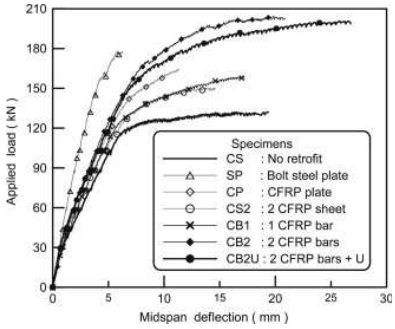


شکل(۳) : *مراحل تست آزمایشگاهی*

٤. بحث :

۴. ۱. رفتار خمشی :

منحنی‌های انحراف وسط دهانه در مقابل بار آزمایشی همهٔ تیرها در شکل ۴ ، ارائه شده است. نمونه CS تیربتونی مسلح ، بدون تقویت و با ضریب تقویت کشش ٪ ۸۷ خیلی پایین تر از ضریب تقویت متعادل ٪ ۲/۷ = Pb رفتار بسیار انعطاف پذیری را نشان می‌دهد. ترک خوردگی بتون در وسط دهانه با بارKN ۱۹/۸ شروع شد و ترک خوردگی بیشتر بتون بعداً در ناحیه گشتاور خمش خالص، اتفاق افتاد. میله‌های تقویت کنندهٔ اصلی، تحت بار KN ۱۰۱ تسلیم شدند،که با ترکهای برشی مورب ایجاد شده فراتر از دهانه یعنی ناحیه که گشتاور خمشی خالص با افزایش بار اتفاق می‌افتد ، همراه بود. پس از تسلیم تقویت فولاد کششی، انحراف فقط با افزایش جزئی بارگذاری، شدیداً افزایش یافت. تیر کنترل نهایتاً در بار KN ۱۳۱/۸ گسیخته شد که شکستگی و خرده شدن بتون را در ناحیه فشاری بین دو نقطه بارگذاری به دنبال داشت.



شکل (4) : *منحنی انحراف (مرکز دهانه) – بار (اعمال شده) ، تا زمانیکه بارگذاری به حداکثر می رسد.*

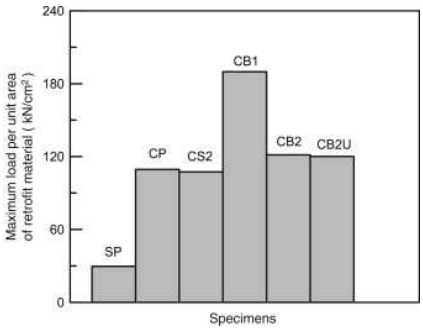
در نمونه SP مقاوم سازی شده با پلیتهای فولادی پیچی ، منحنی بارــ انحراف، در بار حداکثر، سختی خمشی بالایی نشان داد . پس از باری که بتون را ترک داد. سختی خمشی کمی کاهش یافت ، اما در بار حداکثر تقریباً ثابت باقی ماند. پس از رسیدن به بارحداکثر ، نمونه SP ، افت بار ناگهانی را تجربه کرد که جدا شدن بتون پوششی را به دنبال داشت. تیر بتونی مسلح تقویت شده با میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP پیشنهاد شده (نمونه CB2) با خمش زیاد وسط دهانه در مقایسه با دیگر تیرهای تقویت شده، ظرفیت حمل بار بیشتری نشان داد نتایج آزمایش در مورد ظرفیت حمل بار و خمش در تسلیم میله‌های فولادی و بار حداکثر، در جدول ۲ ، ارائه شده است. همهٔ تیرهای تقویت شده، در ظرفیت حمل بار نهایی خود ، یک افزایش اساسی نشان دادند. افزایش مقاومت تیرهای تکی از ۱۰٪ تا ۵۵٪ بیشتر از تیر کنترل بود. همانطوریکه در جدول ۳ و شکل۵ ملاحظه می‌شود، با این وجود، حداکثر بار در هر ناحیه مادهٔ تقویت کنندهٔ واحد ، مربوط به میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP از ۱۲۰ تا KN/cm^2 ۱۹۰ برآورد شد که تقریباً ۷۸٪ – ۱۲٪ بیشتر از نمونه‌های تقویت نشده به ترتیب با ورقه‌های CFRP (KN/cm^2 ۱۰۷/۴) و پلیت‌های CFRP (KN/cm^2 ۱۰۹/۵) بود و ۶–۴ برابر بیشتر از نمونه تقویت شده با پلیتهای فولادی پیچی ، بود.

جدول (۲) : *ظرفیت حمل بار و خمش در تسلیم و بار حداکثر*

نمونه	P_{max} (kN)	$P_{max}/P_{CS,max}$	δY (mm)	δU (mm)
CS	۱۳۱/٦	–	٥/۳٥	۱۹/۳۷
SP	۱۷۸/۱	۱/۳٥	۳/۹۷	٦/۲۷
CP	۱٦٤/۲	۱/۲٥	٥/۲٥	۱۱/٤۹
CS2	۱٥۰/۳	۱/۱٤	٥/٦۲	۱٤/٥۸
CB1	۱٥۹/٤	۱/۲۱	٥/۰۹	۱۸/٦٤
CB2	۲۰٤/۱	۱/٥٥	٥/۹۲	۲۰/۹۴
CB2U	۲۰۱/۸	۱/٥۳	٦/۰۲	۲٦/۷۷

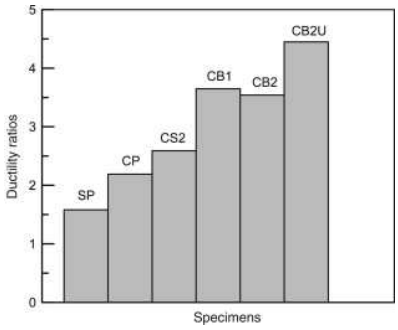
جدول(۳) : *بار حداکثر* در هر ناحیه مادهٔ تقویت کننده *و شکل‌پذیری*

نمونه	مواده تقویت کننده	بار حداکثر در هر ناحیه مادهٔ تقویت کننده(kN/cm2)	شکل‌پذیری)δU/δY(
CS	–	–	۳/۶۲
SP	پلیت فولادی پیچی	۲۹/۷	۱/٥۸
CP	پلیت CFRP	۱۰۹/٥	۲/۱۹
CS2	ورقه CFRP	۱۰۷/۴	۲/٥۹
CB1	میله ذوزنقه‌ای CFRP	۱۸۹/۸	۳/۶٥
CB2	میله ذوزنقه‌ای CFRP	۱۲۱/٥	۳/٥۴
CB2U	میله ذوزنقه‌ای CFRP و اتصالات U شکل	۱۲۰/۱	۴/۴٥



شکل (۵) : *بار حداکثر در هر ناحیه واحد مادهٔ تقویت کننده*

همانطوریکه در جدول ۳ و شکل ۷ مشاهده می‌شود، شکل‌پذیری بصورت نسبت تغییر شکل در بار حداکثر به تغییر شکل در تسلیم تقویت اصلی، اندازه‌گیری شد. در نمونه‌های تقویت شده با تکنیک‌های پیشنهاد شده (CB2U,CB2,CB1)، نسبت‌های شکل‌پذیری بطور قابل توجهی در مقایسه با مورد مربوط به تیرهای مقاوم شده بصورت قراردادی ، بهبود یافتند. شکل‌پذیری ، قابلیت قطعات سازه‌ای را برای حفظ تغییر شکل غیرالاستیک قبل از گسیختگی ،بدون افت مهم در ظرفیت حمل بار توصیف می کند. جذب انرژی بالای غیرالاستیک برای حصول اطمینان از ایمنی قطعات سازه‌ای بتون مسلح مقاوم‌سازی شده (بدون گسیختگی قابل توجه و شکننده الاستیک) موقع بارگذاری اضافی، ترجیح داده می‌شود . ظرفیت جذب انرژی بالاتر در تقویت پیشنهاد شده در ایمنی تیرها بتونی مسلح مقاوم‌سازی شده ، دخیل است.



شکل(۷) : *نسبت های شکل پذیری*

۴. ۲. حالت گسیختگی :

مکانیسم‌های گسیختگی تیرهای بتونی مسلح مقاوم‌سازی شده ، به شش گروه طبقه‌بندی می‌شوند:

(۱) گسیختگی مادهٔ مقاوم‌ساز ، (۲) خرد شدن بتون فشاری ، (۳) گسستگی سطح مشترک ایجاد شده با ترک خمشی میانی ، (۴) گسستگی سطح مشترک ایجاد شده با ترک برش خمشی میانی ، (۵) جدا شدن پوشش بتون و (۶) گسیختگی برشی – کششی همراه با گسستگی سطح مشترک انتهای پلیت.

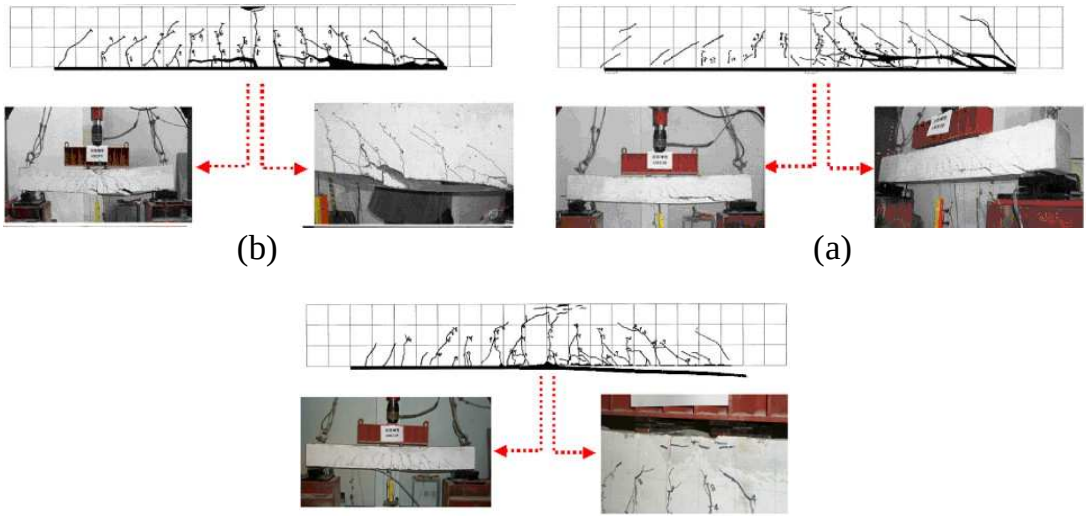
از این مکانیسم‌ها ، سه حال گسیختگی در آزمایشات مشاهده و طبقه‌بندی می‌شوند:

۱-گسستگی سطح مشترک ایجاد شده با ترک خمشی میانی ،۲- جدا شدن پوشش بتون و۳-گسیختگی تنشی – برشی همراه با گسستگی سطح مشترک انتهای پلیت .

تیر کنترل نهایتاً با خرد شدن و پوسته شدن بتون در ناحیه فشاری بین نقاط بارگذاری پس از تسلیم میلگرد فولادی، گسیخته شد. این تیر، رفتار خمشی بسیار شکل‌پذیری را نشان داد. در مورد تیر SP ، ترک‌های شیب‌دار تا حدودی منتشر شده و سپس چند ترک مورب بلافاصله با افزایش بارگذاری ، شکل گرفتند. یک ترک سریعاً از انتهای پلیت فولادی، با رسیدن بار به مقدار حداکثر تقریباً ۸۰٪ گسترش یافت.

این تیر بواسطه گسستگی سطح مشترک انتهای پلیت گسیخته شد که از جدا شدن پوشش بتون منتج گردید. همانطوریکه در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود. افت ناگهانی پس از بارگذاری حداکثر، نشان داد که ظرفیت حمل بار نمونه SP بطور قابل توجهی پس از شکستن بتون واقع در نزدیکی انتهای پلیت. کاهش یافت. درعوض، همه نمونه‌های تیر مقاوم‌سازی شده با پلیت‌های CFRP و ورقه‌های CFRP، بواسطه گسستگی سطح مشترک ایجاد شده با ترک خمشی، گسیخته شدند ، همچنانکه به ترتیب در شکل ۷ (ب) و (ث) مشاهده می‌شوند.

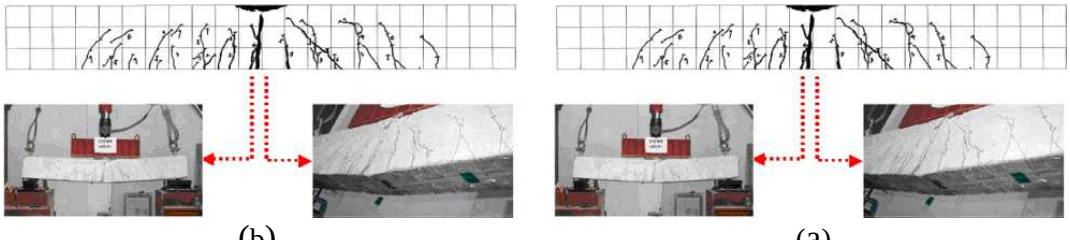
هر دو مکانسیم گسیختگی موضعی مشاهده شده در آزمایشات مربوط به تیرهای مقاوم‌سازی شده بصورت قراردادی ، شکننده (ترد) بوده و قبل از رسیدن نمونه ها به گسیختگی خمشی سرتاسری، اتفاق افتادند.این نوع گسیختگی های موضعی، از گسیختگی تیر های مقاوم‌سازی شده تحت کنترل گسیختگی خمشی، با رسیدن به ظرفیت های خمشی نهایی و عملکرد های مورد نظر ، جلوگیری کردند.



شکل(۷) :

الگو های ترک نمونه ها برای : (الف) SP، (ب) CP و (ث) CS2

برعکس، هر دو نمونه CB1 و CB2 تقویت شده با میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP پیشنهاد شده ، حالت گسیختگی کششی نشان دادند که بیانگر افزایشات اساسی در شکل‌پذیری بود، همانطوریکه در شکل ۸ ملاحظه شود. در مورد تیر CB1، با افزایش بار، چند ترک در بتون در سطح مشترک مجاور میله CFRP ظاهر شد که با شروع دامنه غیرالاستیک منحنی بار – انحراف همراه بود. وقتی بار به حداکثر رسید ،ترک های زیادی در سطح مشترک وجود داشتند که بیانگر انحراف زیاد تیر بود. پس از بار حداکثر، این بار بتدریج کاهش یافت که گسیختگی خمشی بواسطهٔ لغزش پیوستگی میله CFRP را از بتون شیاردار، به دنبال داشت. این کاهش تدریجی در بار پس از حداکثر عمدتاً به وجود به هم پیوستگی مکانیکی بین میله CFRP و ماتریس پیرامون نسبت داده می‌شود حتی اگر لغزش پیوستگی قبلاً صورت گرفته باشد. بنابراین، مقاوم‌سازی از طریق جاسازی میله ذوزنقه‌ای CFRP در شیار بتون، میتواند عمل کامپوزیت را در تیرهای مقاوم‌سازی شده، بهبود داده و در جلوگیری از گسیختگی‌های موضعی قبل از رسیدن تیرها به گسیختگی خمشی، مفید واقع شود.

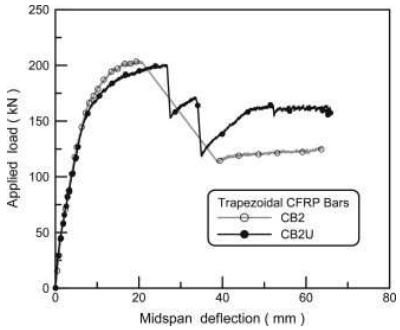


شکل (۸) : *الگو های ترک نمونه ها برای : (الف) CB1 و (ب) CB2U*

همچون نتایج آزمایش فوق در مورد نمونه CB1، نمونه CB2 نیز بواسطهٔ لغزش پیوستگی میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP گسیخته شد که بیانگر انحراف بیشتر تیر و کاهش تدریجی پس از بار حداکثر بود. با این وجود، با نزدیک شدن گسیختگی، یک ترک طولی در بتون در لایه میله CFRP گسترش یافت: سپس جدا شدن پوشش بتون اتفاق افتاد که برخلاف الگوی مشاهده شده در نمونه CB1 بود. این به احتمال زیاد با عدم مقاومت مقطع پوششی در مقابل نیروهای ترکیدگی در طول میله‌های CFRP، ایجاد می‌شود. بنابراین، کمک بیشتر، از قبیل استفاده از اتصالات فلزی U شکل پیچی همچون نمونه CB2 باید در کنترل پیشرفت ترک‌ها در طول میله‌های CFRP و جدا شدن پوشش بتون، خیلی موثر باشد.

۴. ۳. بکارگیری اتصالات فلزی :

همانطوریکه در شکل ۸ (ب) مشاهده می‌شود، استفاده از اتصالات فلزی U شکل همچون نمونه CB2U ظاهراً از حالت گسیختگی بواسطهٔ جدا شدن پوشش بتون، برخلاف نمونه CB2، جلوگیری می‌کند. این بواسطهٔ اتصالات فلزی U شکل است که با محصورسازی میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP در ماتریس پیرامون ،به بارهای حداکثر بعدی پس از اولین بار حداکثر در منحنی انحراف– بار کمک کند همانطوریکه در شکل ۹ ملاحظه می‌شود. با این وجود، استفاده از اتصالات فلزی U شکل می‌تواند کارایی مقاوم‌سازی ثانویه علاوه بر تغییر حالت گسیختگی فراهم نماید. نمونه CB2U نیز بواسطهٔ لغزش پیوستگی میله‌های CFRP گسیخته شد که انحراف بیشتر تیر و کاهش تدریجی پس از بار حداکثر را نشان می‌دهد.



شکل (۹) : *منحنی بار اعمال شده در مقابل انحراف وسط دهانه تیر RC مقاوم سازی شده و طراحی شده بر اساس تکنولوژی تقویت پیشنهاد شد .*

با این وجود، با نزدیک شدن گسیختگی، یک ترک طولی در لایه میله CFRP گسترش یافته و سپس جدا شدن لایه بتوان برخلاف الگوی مشاهده شده در نمونه CB1، اتفاق افتاد.

در بررسی آزمایش حاضر، بهبود عملکرد پیوستگی ازطریق بکارگیری میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP در شیار بتون، مشاهده شده است. علت امر اینست که عملکرد تیرهای تقویت شده بطور موثر با بکارگیری تکنولوژی تقویت پیشنهاد شده یعنی میله‌های CFRP مدوله شده از لحاظ هندسی با مقطع عرضی

ذوزنقه‌ای جاسازی شده در شیار ایجاد شده در کف تیر بتونی، حاصل می‌شود. این بهبود می‌تواند از گسیختگی موضعی زودهنگام ناشی از گسستگی سطح مشترک جلوگیری کند که عموماً در سیستم‌های مقاوم‌سازی بیرونی از قبیل پلیت‌های فولادی، ورقه‌های FRP و پلیت‌ها FRP، مشاهده می‌شود.

۵. نتایج کلی :

نتیجتاً، تست‌های خمشی بر روی شش تیر بتونی مسلح مقاوم‌سازی شده برای بررسی بهبود پتانسیل عملکرد خمشی از طریق بکارگیری تکنولوژی تقویت پیشنهاد شده، انجام شدند. نتایج بعدی را میتوان از مشاهدات آزمایشی بدست آورد.

۱- استفاده از میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP ، عملی ، آسان و در مقاوم‌سازی تیرهای بتونی، موثر است.

۲- استفاده از میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP پیشنهاد شده، شکل‌پذیری و ظرفیت حمل بار نهایی تیرها را افزایش داده و تیرهای تقویت شده با روش انعطاف‌پذیر، گسیخته می‌شوند.

۳- عملکرد بهتر کامپوزیت با استفاده از میله‌های ذوزنقه‌ای CFRP در شیار بتون همراه با اتصالات فلزی U شکل پیچی، تحقق یافته است. تکنولوژی مقاوم‌سازی پیشنهاد شده، مزایای قابل توجهی را در جلوگیری از گسیختگی‌های موضعی به هنگام مقایسه با تکنولوژی مقاوم‌سازی قراردادی با استفاده از عناصر پلیت/ورقه، در پی دارد.

٦. فهرست منابع :

1) J.B. Mander, M.J. Priestley and R. Park, Theoretical stress–strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE 114 (8) (1988), pp. 1804–1826.
۲) A. Mirmiran and M. Shahawy, Behavior of concrete columns confined by fiber composites, Journal of Structural Engineering, ASCE 123 (5) (1997), pp. 583–590.
۳) H. Saadatmanesh, M.R. Ehsani and M.W. Li, Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps, ACI Structural Journal 91 (4) (1994), pp. 434–447.
۴) Takahashi Y, Sato Y, Ueda T, Maeda T, Kobayashi A. Flexural behavior of RC beams with externally bonded carbon fiber sheet. In: Proceedings of the third international symposium on nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures. 1997. p. 327–34.
۵) H. Saadatmanesh and M.R. Ehsani, RC beams strengthened with FRP plates I: Experimental study, Journal of Structural Engineering, ASCE 117 (11) (1991), pp. 3434–3455.
۶) A.M. Malek, H. Saadatmanesh and M.R. Ehsani, Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, ACI Structural Journal 95 (1) (1998), pp. 142–152.