

مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح به روش نصب نزدیک سطح با استفاده از میله های ساخته شده از الیاف کربن

میثم جلالی^۱، فرشید جندقی علایی^{۲*}، محمدکاظم شربتدار^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

farshidja@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۱۶

چکیده- مطالعه آزمایشگاهی انجام شده، تأثیر مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح به کمک روش نصب نزدیک سطح با استفاده از میله های ساخته شده از صفحات الیاف کربن را ارزیابی می کند. برای ایجاد تأخیر در شروع جداشدگی میله از تیر، مهار انتهایی جدیدی برای آن ها پیشنهاد شده که آزمایش می شود. در این مقاله، نتایج آزمایش های انجام شده روی شش عدد تیر بتن مسلح دوسر ساده با مقطع مستطیل شکل که در برش، مقاوم سازی شده است، ارائه می شود. پاسخ نیرو- تغییر مکان همه ی نمونه ها و تغییرات کرنش در قسمت های مختلف ارائه خواهد شد. همچنین کارکرد و مدهای گسیختگی تیرها بررسی خواهد شد. نتایج آزمایش ها بیانگر از کارآمدی میله ها و مهارهای پیشنهادی بوده است؛ به گونه ای که افزایش ظرفیت باربری نمونه های مقاوم سازی شده روش پیشنهادی، ۲۵ تا ۴۸ درصد نمونه مرجع به دست آمده است و در نتیجه استفاده از مهارهای انتهایی پیشنهادی، انرژی جذب شده به وسیله ی نمونه ها، افزایش چشم گیری پیدا کرده است. در انتها، مدل تحلیلی Rizzo and De Lorenzis برای برآورد مشارکت سامانه مقاوم سازی این پژوهش ارائه شده است که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، تخمین قابل قبولی به دست می دهد.

واژگان کلیدی- مهار انتهایی FRP، میله BMCF، مقاوم سازی برشی، تیرهای بتن مسلح، روش نصب نزدیک سطح

۱- مقدمه

الیاف (FRP) که روی سطوح بتنی چسبانده می شوند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۳ و ۹] (این روش از این پس در این مقاله به نام روش EB^۲ نامیده می شود). مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح به روش EB با سه روش الف) نصب صفحات FRP روی سطوح جانبی تیر، ب) نصب صفحات FRP روی سطوح جانبی و زیر تیر (به صورت U شکل) و

مقاوم سازی سازه های بتن مسلح بنا به دلایلی چون افزایش بارهای وارد شده در دوره بهره برداری، آسیب یا از بین رفتن سازه و کمبودهای احتمالی در طراحی و ساخت، ضروری است [۲ و ۱]. معمولاً افزون بر مقاوم سازی خمشی تیرهای بتن مسلح [۳ و ۴]، مقاوم سازی برشی [۵، ۶ و ۷] نیز لازم است. بین روش هایی که برای مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح به کار می رود [۸ و ۹]، استفاده از پلیمرهای مسلح به

1- Fiber Reinforced Polymer
2- Externally Bonded

ج) دورپیچ کامل تیر به وسیله‌ی صفحات FRP، انجام می‌شود [۵ و ۶]. گسیختگی نهایی همه‌ی تیرهای تقویت‌شده به روش الف و بیشتر تیرهای تقویت‌شده به روش ب، به خاطر جداسازی^۱ صفحات FRP از سطح بتن گزارش شده است [۶]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که حتی در برخی از مواردیکه از روش ج برای مقاوم‌سازی برشی استفاده می‌شود، گسیختگی برشی تیر به خاطر جداسازی FRP رخ داده است [۵ و ۱۱]. روش جدیدی که در سال‌های نزدیک برای مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح به کار می‌رود، روش نصب نزدیک سطح^۲ (NSM) است [۱۲ و ۱۳]. در این روش، میله‌ها یا نوارهای FRP به کمک چسب‌های ویژه داخل شیارهای تعبیه شده سطح بتن نصب می‌شوند. در روش NSM از میله‌های FRP با سطح مقطع دایره‌ای [۱۳ و ۱۴] یا نوارهای FRP با سطح مقطع مستطیل شکل [۱۴-۱۷] استفاده شده است. Rizzo و DeLorenzis [۱۴] اثر نوع FRP استفاده شده، نواری یا میله‌ای، را بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که استفاده از نوارهای FRP به جای نوع میله‌ای، منجر به کاهش مشارکت FRP در باربری برشی خواهد شد و دلیل آن را سختی بیشتر در رفتار لغزش-چسبندگی نوارهای FRP (در مقایسه با میله‌های FRP) دانستند. درصد مصالح FRP به کار رفته در آزمایش‌های این محققین در قیاس با تحقیقات مشابه [۱۵ و ۱۸] زیاد بوده است و مد گسیختگی بیشتر نمونه‌های آن‌ها، جدا شدن گروهی میله‌ها یا نوارهای FRP همراه بتن پوشش^۳ آرماتورهای برشی فولادی در جوانب تیر، گزارش شده است [۱۴]. میزان FRP استفاده‌شده و مقاومت بتن، نقش اساسی در رفتار گسیختگی تیرهای این محققین داشته است. Diass و Barros [۱۵ و ۱۶] تیرهای T شکل بزرگ مقیاس را با استفاده

از نوارهای FRP با روش NSM مقاوم‌سازی برشی کردند. بر پایه‌ی یافته‌های این محققین، که اثر درصد و زاویه تمایل نوارهای FRP را بررسی کرده‌اند، گسیختگی تیر در نمونه‌هایی که با درصد پایین FRP مقاوم‌سازی شده بودند، به خاطر جدا شدن مستقل نوارهای FRP، همراه بخش‌هایی از بتن بوده است. همچنین با افزایش درصد FRP، ظرفیت باربری تیر افزایش یافته و جدا شدن گروهی میله‌های FRP همراه بخش‌های زیادی از بتن پوشش به عنوان مد گسیختگی غالب معرفی شده است (این مد گسیختگی در نتایج آزمایش‌های دیگری که به وسیله‌ی همین محققین انجام شده [۱۷] نیز گزارش شده است). Rahal و همکارانش نیز اثر استفاده از میله‌های FRP را در مقایسه با آرماتورهای فولادی در روش NSM بررسی کردند [۱۸]. تیرهای آزمایش شده به وسیله‌ی ایشان، دچار گسیختگی خمشی شد ولی شکست برشی در آن‌ها رخ نداد.

با استناد به مطالب گفته‌شده، می‌توان گفت در مواردیکه برای مقاوم‌سازی برشی تیرها به روش NSM از درصد‌های پایین FRP استفاده شده، جداسازی مستقل میله‌های FRP یکی از دلایل اصلی گسیختگی برشی تیرها بوده است (در مقابل جداسازی گروهی میله‌های FRP در مواردی که از درصد‌های بالای FRP برای مقاوم‌سازی برشی استفاده شده). در چنین شرایطی، بهبود رفتار چسبندگی FRP با روش‌هایی چون مهار FRP، در به تعویق انداختن جداسازی FRP و به دنبال آن، گسیختگی تیر، تأثیر زیادی خواهد داشت.

در این پژوهش، میله‌های ساخته‌شده از صفحات الیاف کربن به نام^۴ BMCF، همراه مهارهای جدید انتهایی آن‌ها استفاده می‌شود. این میله‌ها از ترکیب الیاف خشک کربن، میله چوبی کم‌مقاومت به عنوان هسته مرکزی و چسب

1- Debonding

2- Near-Surface-Mounted

3- Cover Concrete

4- Bars Made of Carbon Fabrics

ضعیف و همچنین در وسط تیر در نظر گرفته می شود. یک تیر تقویت نشده به عنوان نمونه مرجع و پنج تیر دیگر به عنوان نمونه های تقویت شده که همگی در دهانه ضعیف خود طرح مقاوم سازی دارند، در نظر گرفته می شوند. در ادامه، مشخصات نمونه های تقویت شده تشریح می شود.

در نمونه VB، از میله های قائم BMCF و در نمونه IB، از میله های مایل BMCF با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور طولی تیر برای مقاوم سازی برشی تیر استفاده می شود. درصد استفاده از میله های BMCF در دو نمونه VB و IB یکسان است. دو نمونه تقویت شده دیگر، نمونه های VBA و IBA است که به ترتیب، مشابه نمونه های VB و IB در نظر گرفته می شوند؛ با این تفاوت که در طرح مقاوم سازی آن ها، از میله های BMCF با مهارهای انتهایی، که در ادامه معرفی می شوند، استفاده می شود. جدول ۱، خلاصه جزئیات مقاوم سازی نمونه ها را نشان می دهد. تیرها به صورت دوسر ساده و تحت اثر بارگذاری متمرکز تک نقطه ای در وسط دهانه قرار می گیرند. بارگذاری به صورت یک طرفه و به طور استاتیکی روی نمونه های با سن ۷۵ روز اعمال می شود.

۳- مشخصات مصالح

۳-۱- مصالح پایه

یک طرح اختلاط مشترک برای همه ی نمونه ها به کار می رود. مقاومت فشاری بتن در ۲۸ روز و همچنین در زمان انجام آزمایش ها، به وسیله ی نمونه های استوانه ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر اندازه گیری می شود. مشخصات مکانیکی آرماتورها نیز با آزمایش کشش مستقیم روی نمونه هایی به طول ۳۵۰ میلی متر به دست می آید. جدول ۲، مقادیر متوسط به دست آمده از آزمایش ها را نشان می دهد.

برای چسباندن میله های BMCF به بتن، چسب

اپوکسی ساخته می شود. مهم ترین ویژگی این میله ها، که در آزمایشگاه ساخته شده و دست ساز است داشتن امکان ساخت مهارهای انتهایی است که در میله های متعارف FRP ممکن نیست.

شش عدد تیر بتن مسلح با مقطع مستطیل شکل، طراحی و ساخته شده که پنج عدد از آن ها به روش NSM و با استفاده از میله های BMCF با یا بدون مهار انتهایی، مقاوم سازی برشی شده است. در طرح مقاوم سازی نمونه ها از درصدهای پایین BMCF برای مقاوم سازی استفاده شده تا رفتار جداشدگی مستقل میله های BMCF حاکم بر رفتار گسیختگی تیرها باشد. برای داشتن شرایط واقعی تر، در همه ی نمونه ها مقدار محدودی آرماتور برشی فولادی داخلی نیز در نظر گرفته شده است. جزئیات انجام آزمایش ها و نتایج آن ها در این مقاله ارائه می شود.

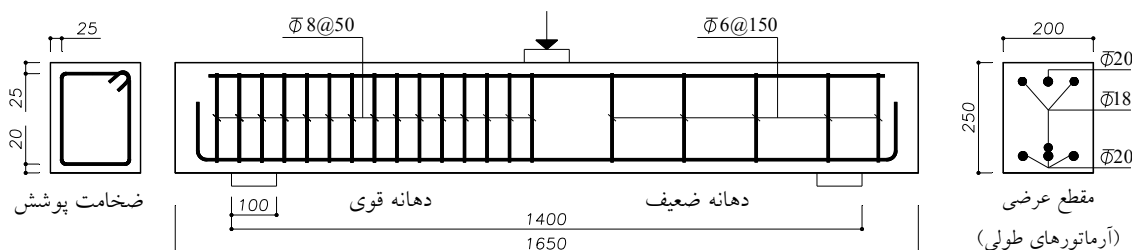
۲- برنامه آزمایشگاهی

برای ارزیابی چگونگی تأثیر میله های BMCF در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح به روش NSM، شش عدد تیر بتنی با ضعف برشی طراحی می شود. در همه ی نمونه ها، ابعاد و همچنین آرماتورگذاری داخلی، یکسان و همانند شکل ۱ در نظر گرفته می شود.

مانند بسیاری از آزمایش های سایر محققین در پژوهش های مشابه [۱۹ و ۲۰]، در طراحی و ساخت نمونه ها مقطع مستطیل شکل به کار می رود. نیمی از طول هر تیر با ضعف در باربری برشی و تحت عنوان "دهانه ضعیف" و نیم دیگر به عنوان "دهانه قوی" و بدون ضعف برشی، طراحی می شود. به این ترتیب، مقاوم سازی برشی، تنها در دهانه ضعیف مورد نیاز بوده و دهانه قوی به گونه ای طراحی می شود که حتی با وجود مقاوم سازی در دهانه ضعیف، گسیختگی در آن رخ ندهد. تجهیزات اندازه گیری کرنش روی آرماتورهای برشی و BMCF، برای دهانه

میله های BMCF، از چسب دو قسمتی با لزجت پایین، برای آسان کردن ساخت میله ها، استفاده می شود. بر پایه ی دستور کار شرکت سازنده چسب، از نسبت اختلاط ۳ به ۱ (رزین به سخت کننده) برای تهیه هر دو نوع چسب، استفاده می شود. مشخصات مکانیکی صفحات FRP در جدول ۲ ارائه شده است.

دوقسمتی با لزجت بالا، برای جلوگیری از روان شدن چسب هنگام کار، به کار می رود (جزئیات طرح مقاوم سازی و روش ساخت میله های BMCF در قسمت های بعدی ارائه شده است). بر پایه ی اطلاعات شرکت سازنده چسب، مقاومت چسبندگی، فشاری و خمشی متوسط چسب به ترتیب ۱/۵، ۸۰ و ۳۰ مگاپاسکال است. در فرایند ساخت



شکل (۱) جزئیات آرماتورگذاری نمونه ها (ابعاد به میلی متر)

جدول (۱) مشخصات کلی نمونه ها

مقاوم سازی در دهانه ضعیف				نمونه
مهار انتهایی	زاویه نسبت به محور تیر (درجه)	فاصله میله های BMCF در امتداد محور طولی تیر (میلی متر)	سطح مقطع الیاف در هر میله BMCF (میلی متر مربع)	
مرجع	-	-	-	
VB	خیر	۹۰	۱۶۰	۱۲
IB	خیر	۴۵	۲۴۰	۱۲
VBA*	بلی	۹۰	۱۶۰	۱۲
IBA	بلی	۴۵	۲۴۰	۱۲
VBA-W*	بلی	۹۰	۱۶۰	۱۲

* تفاوت این دو نمونه در جزئیات مهارهای انتهایی میله ها است.

جدول (۲) مشخصات مصالح پایه

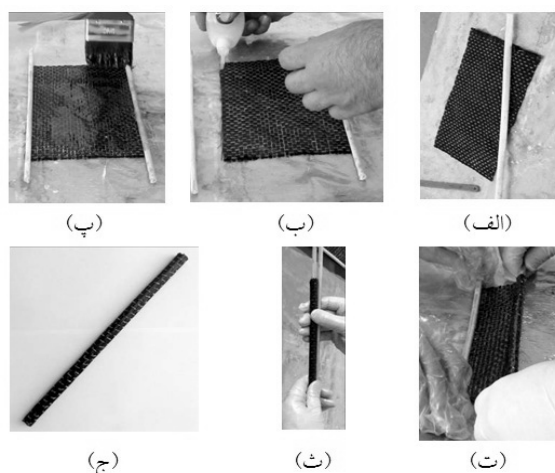
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)					بتن	
۳۶/۴ (در زمان آزمایش -۷۵ روز)			۲۵/۱ (۲۸ روزه)			
۲۰ϕ	۱۸ϕ	۸ϕ	۶ϕ	قطر آرماتور	فولاد	
۵۷۰	۴۸۶	۵۴۰	۲۰۳	تنش تسلیم (مگاپاسکال)		
۶۷۷	۵۷۲	۵۹۸	۲۴۸	تنش بیشینه (مگاپاسکال)		
مدول ارتجاعی (مگاپاسکال)		کرنش گسیختگی (%)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	ضخامت (میلی متر)	نوع FRP	صفحات FRP
۲۳۵		۱/۵	۳۵۵۰	۰/۱۱	کربن مقاومت بالا	

۳-۲- میله‌های BMCF

میله‌های BMCF سه جزء اصلی دارند: (۱) صفحات الیاف کربن خشک که الیاف آن تنها در یک راستا قرار دارد (یک‌جهته)؛ (۲) چسب اپوکسی با لزجت پایین و (۳) میله چوبی کم‌مقاومت به عنوان هسته مرکزی. برای ساخت میله‌های BMCF، ابتدا صفحات FRP به وسیله‌ی چسب مخصوص، اشباع شده و سپس به دور میله‌های چوبی تابیده می‌شود. در اولین مرحله، پهنای صفحه FRP بر پایه‌ی سطح مقطع مورد نیاز (حاصل ضرب عرض در ضخامت صفحه FRP) محاسبه می‌شود. طول صفحه FRP به میزان طول میله BMCF انتخاب شده و در نتیجه صفحه FRP با طول و عرض گفته شده مطابق (شکل ۲-الف) بریده می‌شود. در مرحله بعد، میله چوبی، یک طرف صفحه FRP چسبانده شده و چسب دوقسمتی آماده می‌شود. میله چوبی با چسب زودگیر با لزجت پایین به صفحه FRP متصل می‌شود. برای آسان کردن فرایند ساخت، میله چوبی دیگری در طرف دیگر صفحه FRP چسبانده شده (شکل ۲-ب)، سپس صفحه FRP به گونه‌ای یکنواخت با چسب اپوکسی مطابق شکل ۲-پ اشباع شده و به دور میله چوبی اول تابیده می‌شود (شکل ۲-ت). صفحات کربن استفاده شده از نوع یک‌جهته است که راستای الیاف باید در راستای محور میله قرار بگیرد سپس هوای محبوس بین لایه‌های FRP، با دست، مانند شکل ۲-ث خارج می‌شود. میله ساخته شده برای عمل‌آوری و رسیدن چسب مقاومت مناسب، پنج روز در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) نگهداری می‌شود.

سرانجام میله چوبی دوم به کمک تیغه ویژه از سایر قسمت‌ها جدا می‌شود. باید توجه داشت که با این کار، بخشی از پهنای اولیه صفحه FRP (حدود ۱۰ میلی‌متر) بریده می‌شود و لازم است که این عرض به مقدار اولیه عرض

صفحه FRP اضافه شود. شکل ۲-ج میله BMCF را در حالت نهایی خود نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این میله‌ها، داشتن نسبت محیط به مساحت FRP بالا نسبت به میله‌های متعارف FRP است؛ همچنین شکل دایره‌ای آن، نه تنها از لحاظ ساخت، سهولت بیشتری را فراهم می‌کند بلکه بر پایه‌ی یافته‌های Rizzo و DeLorenzis [۱۴] برای مقاوم‌سازی برشی، مناسب‌تر از نوارهای FRP است.



شکل (۲) فرایند ساخت میله‌های BMCF

مشخصات مکانیکی میله‌های BMCF با انجام آزمایش کشش مستقیم روی نمونه‌هایی که مطابق دستور کار ارائه شده در مرجع ۲۱ ساخته شده بودند، به دست می‌آید. نتایج آزمایش، کشش مستقیم مدول ارتجاعی میله‌های BMCF را بین ۲۱۵ تا ۲۳۰ گیگاپاسکال نشان می‌دهد. قطر نهایی میله‌های BMCF، حدود ۱۰ میلی‌متر (با وجود ۱ میلی‌متر خطا) است.

۳-۳- مهار انتهایی پیشنهادی برای میله‌های BMCF

در مقاوم‌سازی برشی به روش NSM، در حالتی که فاصله بین میله‌ها یا نوارهای FRP زیاد است، گسیختگی معمولاً از نوع جداشدگی مستقل میله‌های FRP است [۱۶]. برای ایجاد

شیارها زدوده می شود.

۳- حدود دو سوم فضای داخلی هر شیار، به وسیله ی چسب ویژه (با لزجت بالا) به کمک کاردک پر می شود.

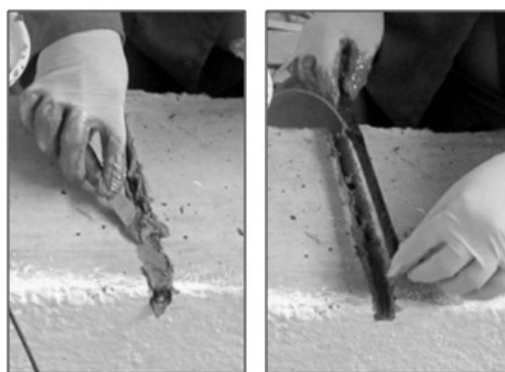
۴- میله BMCF داخل شیار قرار داده شده و با فشار دست کمی به داخل چسب رانده می شود. این کار باعث می شود فضای بین میله BMCF و بتن به طور کامل با چسب پر شود و حفره ای ایجاد نشود (شکل ۳-ب).

۵- شیار به طور کامل با چسب پر شده و سطح آن با سطح بتن اطراف هم تراز می شود (شکل ۳-پ).

۶- نمونه ها در کمترین حالت، پنج روز در دمای اتاق نگهداری می شوند تا چسب به مقاومت نهایی خود برسد.



(الف)



(ب)

(پ)

شکل (۳) روش مقاوم سازی؛ الف: شیارزنی، ب: قراردادن میله BMCF داخل شیار که دو سوم آن آغشته به چسب است، پ: پر کردن شیار با چسب

در همه ی نمونه ها، تجهیزات اندازه گیری کرنش (کرنش سنج) روی میله های BMCF، آرماتورهای فولادی

تأخیر و تا اندازه ای جلوگیری از وقوع این گسیختگی، در این پژوهش مهار انتهایی جدیدی برای میله های BMCF، ارائه شده است. برای ساخت این مهارها، در اولین گام، میله های BMCF با الیاف خشک اضافی در دو انتها ساخته می شود. سپس الیاف خشک با چسب (با لزجت پایین) اشباع شده و دور میله چوبی دیگری تابیده می شوند. جزئیات کامل روند ساخت مهار انتهایی در مرجع ۲۳ آمده است.

از مهم ترین مزیت های مهار انتهایی پیشنهادی آن است که برای نصب آن، دسترسی به جوانب تیر کافی است. همچنین مهارهای انتهایی پیشنهادی باعث افزایش تماس میله های BMCF با تیر می شود که با هدف به تأخیر انداختن پدیده جداشدگی میله های BMCF از تیر اتفاق می افتد و در آزمایش های این پژوهش، بررسی می شود.

لازم است گفته شود که در ساخت مهار انتهایی برای میله های BMCF در تیر VBA-W، برای آسان سازی فرایند ساخت مهار انتهایی، ۳۰ درصد الیاف به کاررفته در ساخت میله، در قسمت مهار انتهایی آن حذف می شود. به عبارت دیگر، در مهار انتهایی نمونه VBA-W، تنها ۷۰ درصد الیاف به کاررفته در ساخت میله BMCF، به کار می رود.

۴- جزئیات مقاوم سازی و نصب تجهیزات اندازه گیری

مقاوم سازی نمونه ها مطابق مراحل زیر انجام می شود:

۱- شیارزنی روی سطوح جانبی تیر در دهانه ضعیف با دستگاه شیارزن مجهز به تیغه الماسه، مطابق شکل ۳-الف انجام می شود. همه ی شیارها با مقطع مربعی به ابعاد ۱۵×۱۵ میلی متر ایجاد می شوند.

۲- وجود گرد و غبار ناشی از ایجاد شیارها، از ایجاد چسبندگی مناسب بین چسب و بتن جلوگیری می کند. در نتیجه، گرد و غبار موجود به وسیله ی هوای فشرده، از داخل

طرف ضعیف و همچنین بتن فشاری (در جوانب تیر، زیر محل بارگذاری) نصب می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییر مکان وسط تیر، تغییرمکان سنج^۱ (LVDT) در زیر تیر قسمت میانی قرار می‌گیرد.

بارگذاری به وسیله ی یک دستگاه جک هیدرولیک با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن و به روش کنترل تغییر مکان، انجام می‌شود. در فواصل منظم، روند بارگذاری به مدت کوتاه متوقف می‌شود تا امکان مشخص کردن ترک‌ها فراهم آید. تغییرمکان‌ها و تغییرات کرنش به وسیله دستگاه ثبت اطلاعات با نرخ ثبت یک داده در ثانیه، ذخیره می‌شود.

۵- نتایج آزمایش‌ها

۵-۱- رفتار کلی و مدهای گسیختگی

۵-۱-۱- نمونه مرجع

در بار ۵۰ کیلونیوتن، ترک‌های خمشی، وسط دهانه تیر مرجع دیده شده است. اولین ترک برشی مایل، وسط دهانه ضعیف در بار ۱۰۳ کیلونیوتن دیده شده است و پس از آن، ترک‌های برشی-خمشی در طرف ضعیف توسعه یافته است؛ تا بار ۲۱۱ کیلونیوتن، این ترک‌ها گسترش یافته و عریض‌تر شده است تا یک ترک برشی مشخص در طرف ضعیف به تدریج مشاهده شود.

سرانجام در بار ۲۶۳/۹۴ کیلونیوتن با شکل‌گیری کامل ترک برشی، مطابق شکل (۴-الف)، تیر دچار گسیختگی برشی شده است.

۵-۱-۲- نمونه‌های IB و VB

در این تیرها که با میله‌های BMCF بدون مهار انتهایی مقاوم‌سازی شده است، شکل اولیه ترک‌خوردگی تقریباً مشابه نمونه مرجع است. اولین ترک‌های برشی در دهانه

ضعیف و در بارهای ۱۲۹ و ۱۳۰ کیلونیوتن به ترتیب در نمونه‌های VB و IB پدیدار شده است. پس از آن، ترک‌های برشی به تدریج در دهانه ضعیف در بازه‌ی وسط تیر ظاهر شده است. دو نمونه VB و IB به ترتیب در بارهای ۳۳۰/۷۶ و ۳۴۳/۷۱ کیلونیوتن، دچار گسیختگی برشی شده است (شکل‌های ۴-ب و ۴-پ). عامل اصلی گسیختگی این دو نمونه، جداشدگی میله‌های BMCF است که البته مشابه جداشدگی کامل و مشخصی که در مقاوم‌سازی برشی به روش EB اتفاق می‌افتد [۹]، نبوده است. مشاهدات و بررسی‌های انجام‌شده پس از آزمایش نشان می‌دهد برخی از میله‌های BMCF همراه بتن اطرافش از تیر جدا شده است؛ به این ترتیب کارکرد یک‌پارچه میله‌های BMCF و تیر، از دست رفته است. همان‌گونه که در شکل‌های ۴-ب و ۴-پ دیده می‌شود، ترک‌های برشی که در سمت ضعیف تیر IB رخ داده است تا حدی بیشتر از ترک‌های برشی نمونه VB است و بازشدگی ترک‌ها نیز در نمونه IB کمتر است که بیانگر کارکرد بهتر میله‌های BMCF مورب (با زاویه ۴۵ درجه) نسبت به میله‌های قائم در مهار و کنترل ترک‌های برشی است. نتایج آزمایش‌ها در جدول (۳) آمده است.

۵-۱-۳- نمونه‌های VBA و IBA

الگوی ترک‌خوردگی ابتدایی این تیرها که به وسیله میله‌های BMCF با مهار انتهایی مقاوم‌سازی شده است، بسیار مشابه تیرهای VB و IB است. اولین ترک‌های برشی در دهانه ضعیف و به ترتیب در بارهای ۱۲۰ و ۱۳۸ کیلونیوتن در نمونه‌های VBA و IBA ایجاد شده است. سپس، ترک‌های برشی بیشتری در دهانه ضعیف رخ داده است تا سرانجام این دو تیر در بارهای ۳۷۱/۸۲ و ۳۹۱/۵۹ کیلونیوتن به ترتیب در نمونه‌های VBA و IBA دچار

1- Linear Variable Differential Transformers

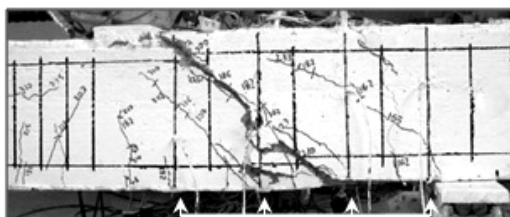
نمونه‌های VB و IB، نمونه VBA و IBA افزون بر آن‌که قبل از گسیختگی تیر ترک‌های برشی بسیار زیادتری داشته، متحمل ترک‌های خمشی بیشتری در وسط دهانه خود نیز شده است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر مقاوم‌سازی برشی با میله‌های مهاردار، در مقایسه با میله‌های ساده، در به تعویق انداختن گسیختگی برشی و تا حدی ایجاد رفتار خمشی در تیرها است.

در این دو نمونه، پس از شکل‌گیری ترک برشی اصلی، جدا شدن بخش‌های چشم‌گیری از بتن پوشش جوانب تیر باعث گسیختگی کلی و افت بار در این نمونه‌ها شده است. در جدول ۳ دیده می‌شود که وجود مهارهای انتهایی باعث افزایش باربری و تغییر مکان نهایی نمونه‌ها (این تغییر مکان متناظر با بار نهایی است) شده است.

گسیختگی برشی شدند. شکل‌های ۴-ت و ۴-ث، وضعیت این نمونه‌ها را پس از گسیختگی نشان می‌دهند.

جداشدگی میله‌های BMCF این دو نمونه، مشابه آنچه در نمونه‌های VB و IB مشاهده می‌شود، رخ نداده است. در نمونه VBA، ترک برشی اصلی که منجر به گسیختگی شده است، در حد فاصل محل بارگذاری و میله BMCF کنار آن رخ داده است. بنابراین، ترک برشی، هیچ‌کدام از میله‌های BMCF را قطع نکرده است (شکل ۴-ت).

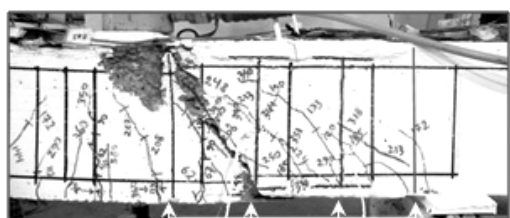
نتیجه می‌شود که مهارهای انتهایی در کنترل بازشدگی ترک‌های متقاطع با میله‌های BMCF مؤثر بوده است؛ به‌گونه‌ای که ترک برشی نهایی بر خلاف نمونه VB که با میله BMCF متقاطع است، به خارج از ناحیه عبور میله‌های BMCF هدایت شده است. در مقایسه با



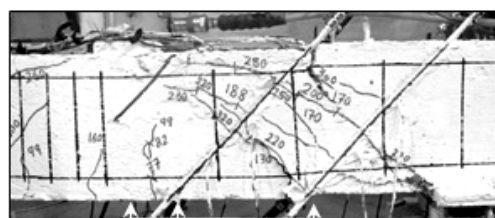
VB نمونه (ب)



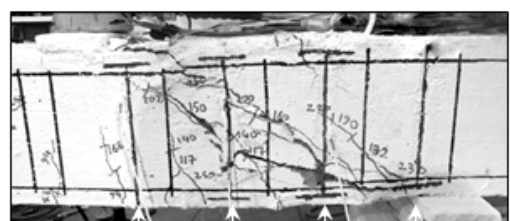
VB نمونه صریح (الف)



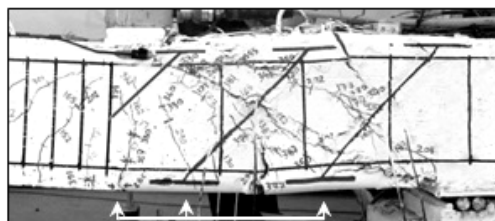
VBA نمونه (ج)



IB نمونه (ب)



VBA-W نمونه (ج)



IBA نمونه (ث)

شکل (۴) الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌ها در دهانه ضعیف (موقعیت میله‌های BMCF با پیکان نشان داده شده است)

جدول (۳) نتایج آزمایش‌ها

نمونه	P_{cr}	Δ_{cr}	P_{U1}	Δ_{U1}	V_f	θ_f	افزایش نسبت به نمونه مرجع (%)		تأثیر مهار انتهایی* (%)		
	کیلو نیوتن	میلی متر	کیلو نیوتن	میلی متر	کیلو نیوتن	°	بیشینه بار	تغییر مکان (در بار بیشینه)	افزایش در بار بیشینه (متناظر با بار بیشینه)	افزایش تغییر مکان	افزایش V_f
مرجع	۵۰	۰/۷۳	۲۶۳/۹۴	۵/۹۸	-	۲۲	-	-	-	-	-
VB	۴۸	۰/۷۰	۳۳۰/۷۶	۶/۸۰	۳۳/۴۱	۴۰	۲۵/۳	۱۳/۷	-	-	-
VBA	۴۰	۰/۷۹	۳۷۱/۸۲	۱۱/۹۰	۵۳/۹۴	۵۷	۴۰/۸	۹۸/۹	۱۲/۴۱	۷۵/۰	۶۱/۴۰
IB	۷۷	۱/۰۱	۳۴۳/۷۱	۶/۹۶	۳۹/۸۸	۲۸	۳۰/۲	۱۶/۳	-	-	-
IBA	۵۰	۰/۷۸	۳۹۱/۵۹	۹/۷۰	۶۳/۸۲	۲۵	۴۸/۴	۶۲/۲	۱۳/۹۳	۳۹/۴	۶۰/۰۲
VBA-W	۴۸	۰/۸۱	۳۲۲/۷۴	۵/۹۶	۲۹/۴۰	۳۲	۲۲/۳	افزایشی نسبت به نمونه VB مشاهده نشد			

P_{cr} : بار ترک خوردگی؛ Δ_{cr} : تغییر مکان متناظر با P_{cr} ؛ P_{U1} : مقاومت نهایی؛ Δ_{U1} : تغییر مکان متناظر با P_{U1} ؛ سهم میله‌های BMCF از برش؛ θ_f : زاویه ترک بحرانی؛ * تأثیر مهار انتهایی: به معنی افزایش پارامترهای مربوطه در نمونه‌های VBA، IBA و VBA-W نسبت به نمونه‌های VB، IB و VB است. برای نمونه، افزایش V_f در نمونه VBA نسبت به نمونه VB به این صورت محاسبه می‌شود:

$$61/4 = (33/41 - 263/94) / (263/94) \times 100$$

۵-۱-۴- نمونه VBA-W

همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، این نمونه مشابه نمونه VBA است؛ با این تفاوت که در ساخت مهارهای انتهایی میله‌های BMCF آن، ۳۰ درصد کاهش در میزان الیاف در نظر گرفته شده است. اولین ترک برشی این نمونه در دهانه ضعیف و در بار ۱۱۷ کیلو نیوتن دیده شده است. از بار ۱۹۰ کیلو نیوتن و تا رسیدن بار به ۲۶۰ کیلو نیوتن، این ترک‌ها در دو راستای خود (به سمت تکیه‌گاه و به سمت محل بار) گسترش یافته است.

سپس ضمن افزایش عرض ترک‌های قبلی، ترک‌های برشی جدیدی نیز در دهانه ضعیف ایجاد شده تا این که یک ترک برشی مشخص از تکیه‌گاه به سمت محل اعمال بار شکل گرفته است. سرانجام این تیر در بار ۳۲۲/۷ کیلو نیوتن به خاطر پارگی در محل اتصال میله BMCF و مهار انتهایی، دچار گسیختگی برشی شده است. هر چند در این طرح از مهارهای انتهایی برای مقاوم‌سازی تیر استفاده شده ولی هیچ افزایشی در ظرفیت باربری این تیر دیده نشد (جدول (۳)).

۵-۲- تغییرات کرنش و تغییر مکان

برای بررسی میزان تأثیر الگوهای مختلف مقاوم‌سازی، ظرفیت باربری همه‌ی نمونه‌ها با نمونه مرجع مقایسه شده است. شکل ۵، منحنی نیروی اعمال شده به تیرها در مقابل تغییر مکان وسط دهانه آن‌ها را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، تغییرات اساسی نمودارها بیشتر معطوف به میزان باربری و تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها در لحظه گسیختگی بوده است. میزان کرنش متناظر با بار بیشینه در آرماتورهای برشی فولادی نمونه‌های تقویت شده، کمتر از نمونه مرجع بوده است که دلیل اصلی آن مشارکت میله‌های BMCF در باربری برشی است. مهارهای تعبیه شده در انتهای میله‌های BMCF، سبب مشارکت بیشتر سامانه مقاوم‌سازی شده است؛ به گونه‌ای که در نمونه‌های VBA و IBA کرنش آرماتورهای برشی فولادی داخلی حتی در بارهای نزدیک به بار نهایی تیر نیز ناچیز است (در مقایسه با نمونه‌های VB و IB).

جدول ۵ نشان می‌دهد که هر کدام از روش‌های مقاوم‌سازی، چقدر انرژی لازم برای تخریب نمونه را بالا می‌برند.

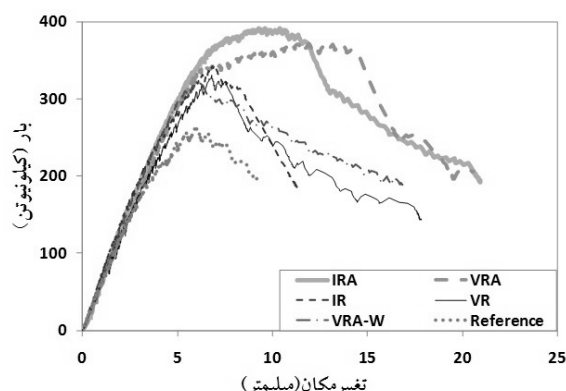
۶- پیش‌بینی مشارکت میله‌های BMCF در ظرفیت برشی

در این قسمت نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیلی [۲۲] برای پیش‌بینی میزان مشارکت میله‌های BMCF در باربری برشی میله‌های ارائه می‌شود. این روش در حالت کلی برای محاسبه میزان مشارکت میله‌ها یا نوارهای FRP در روش NSM ارائه شده است. توضیح و جزئیات این روش در مرجع ۲۲ آمده است و در این جا تنها خلاصه‌ای از آن بیان می‌شود و سپس نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. رابطه تحلیلی ارائه‌شده به‌وسیله‌ی Rizzo و DeLorenzis [۲۲] با رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$V_{f,ana} = 2 \cdot \sum_{i=1}^{N_f} L_{fi} \cdot (\pi \cdot d_f) \cdot \tau_b \cdot \sin(\theta_f) \quad (1)$$

فرضیات اساسی در نظر گرفته شده در این مدل عبارت است از:

- الف) در نظر گرفتن زاویه تمایل ترک‌های برشی به اندازه ۴۵ درجه؛
 ب) پخش یکنواخت تنش‌های چسبندگی در طول میله FRP در لحظه نهایی و



شکل (۵) منحنی نیرو-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها

جدول ۴، مقادیر کرنش در میله‌های BMCF را ارائه کرده است. در این جدول مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش قابل ملاحظه‌ای در میله‌های BMCF متقاطع با ترک برشی اصلی، ایجاد شده است.

کرنش بتن فشاری وسط دهانه در مقابل بار اعمال‌شده به تیر، در جدول ۴ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، کرنش بتن فشاری در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با میله‌های BMCF مهاردار به مراتب بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده است.

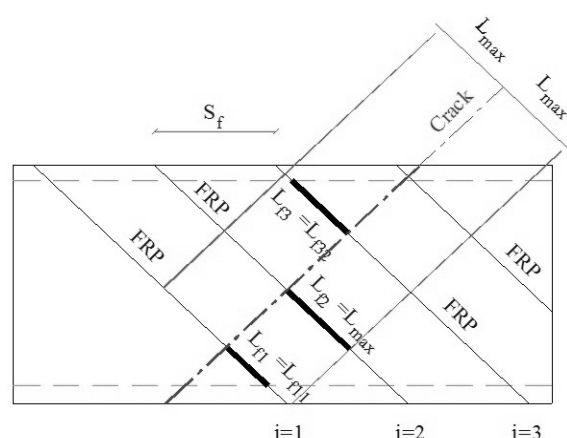
۵-۳- انرژی جذب‌شده

معیار انرژی جذب‌شده از دیدگاه کارکرد در زلزله و همچنین شکل‌پذیری، ارزش ویژه‌ای دارد. در شکل ۶، تغییر مکان وسط تیر در مقابل سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان تا لحظه باربری بیشینه برای هر نمونه نشان داده شده است.

جدول (۴) کرنش در تیرهای مقاوم‌سازی شده در حالت نهایی

نمونه	کرنش در میله BMCF				کرنش در بتن فشاری	
	کمینه (میکرو کرنش)	بیشینه (میکرو کرنش)	میانگین (میکرو کرنش)	افزایش کرنش متوسط (%)	بیشینه (میکرو کرنش)	افزایش (%)
VB	۱۶۱۹	۷۶۲۲	۴۶۲۰	-	۲۳۶۵	-
VBA	۵۳۰۸	۸۸۰۱	۷۰۵۴	۵۲/۶	۴۵۴۵	۹۲/۱
IB	۱۱۸۵	۸۱۰۵	۴۸۱۰	-	۲۷۷۳	-
IBA	۲۶۹۵	۸۶۸۳	۶۰۲۳	۲۵/۲	۴۳۴۰	۵۶/۵

برشی مطابق شکل ۷ برابر فاصله بین نوارهای FRP، S_f ، فرض می‌شود. مقدار L_{fi} همچنین به مقدار بدست آمده از رابطه (۲) محدود می‌گردد (در این رابطه مقدار 0.0059 توسط Barros and Dias [۱۷] پیشنهاد شده است). با توجه به موارد فوق، مقدار L_{fi} از رابطه (۳) بدست می‌آید.



شکل (۷) روش محاسبه L_{fi} ها

$$L_{\max} = 0.0059 \frac{d_f E_f}{4 \tau_b} \quad (2)$$

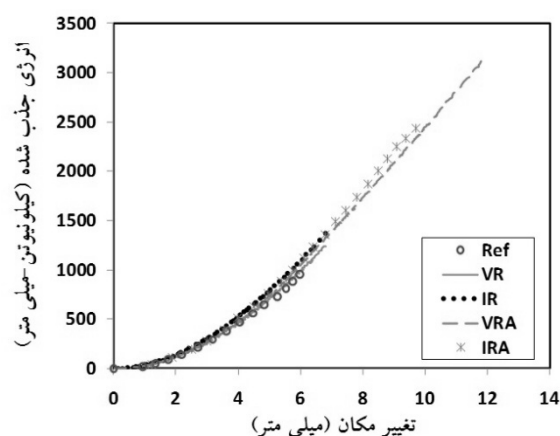
$$L_{fi} = \min[L_{fi1}, L_{fi2}, L_{\max}] \quad (3)$$

که E_f مدول الاستیسیته مصالح FRP و L_{fi} و L_{fi2} طول‌های میله FRP در طرفین ترک برشی هستند که فاصله پوشش بتن از آنها کسر شده است (L_{fi1} معرف قسمت زیر ترک و L_{fi2} معرف قسمت بالای ترک است).

Barros and Dias [۱۷] مقدار $16/1$ مگاپاسکال را به عنوان تنش متوسط چسبندگی معرفی کردند که در مقاله حاضر از این پیشنهاد استفاده می‌شود.

۶-۱- مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

جدول (۶) مقادیر بدست آمده از رابطه (۱) را در مقابل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. روش تحلیلی مطرح شده قابل استفاده برای میله‌های BMCF مهاردار نمی‌باشد. در



شکل (۶) سطح زیر منحنی نیرو تغییر مکان (انرژی جذب‌شده) در برابر تغییر مکان

جدول (۵) انرژی جذب‌شده نمونه‌ها

نمونه	انرژی جذب‌شده (کیلو نیوتن - میلی متر)	انرژی جذب‌شده	
		نسبت به نمونه مرجع	نسبت به نمونه بدون مهارت‌های
مرجع	۹۵۵	—	—
VB	۱۲۳۷	۱/۲۹	—
VBA	۳۱۴۹	۳/۳۰	۲/۵۴
IB	۱۴۰۳	۱/۴۷	—
IBA	۲۴۵۱	۲/۵۶	۱/۷۵

پ) فرض وجود تنش یکنواخت گام قبلی در همی میله‌های FRP متقاطع با ترک برشی در لحظه نهایی. دو فرض آخر به معنی پذیرفتن رفتار چسبندگی-لغزش به صورت کاملاً پلاستیک ایده‌آل است.

در این رابطه، $V_{f,ana}$ میزان مشارکت میله‌های FRP در باربری برشی، τ_b ، تنش چسبندگی متوسط بین FRP و اپوکسی، N_f ، تعداد نوارهای FRP متقاطع با ترک برشی در یک طرف جان و L_{fi} طول قسمت کوتاه‌تر FRP است که در دو طرف یک ترک برشی قرار می‌گیرد (شکل ۷).

در محاسبه L_{fi} آن قسمت از طول نوارهای FRP که در بازه پوشش (کاور) بالایی یا پائینی تیر قرار می‌گیرند در محاسبات وارد نمی‌شوند. فاصله اولین نوار FRP با ترک

۲- در قیاس با نمونه مرجع، نمونه های مقاوم سازی شده با میله های BMCF بدون مهار انتهایی (نمونه های VB و IB) منجر به افزایش ۲۵ تا ۳۰ درصدی در باربری نهایی تیر شده اند. میزان افزایش باربری در نمونه های مقاوم شده با میله های BMCF با مهار انتهایی (نمونه های VBA و IBA) بین ۴۱ تا ۴۸ درصد حاصل شده است.

۳- در نمونه های مقاوم سازی شده با میله های BMCF با مهار انتهایی، ترک های خمشی قابل ملاحظه ای در وسط دهانه تیر تا قبل از لحظه گسیختگی، در قیاس با نمونه های مقاوم سازی شده با میله های BMCF بدون مهار انتهایی، مشاهده شده است. همچنین وجود مهار های انتهایی منجر به افزایش کرنش در میله های BMCF شده است به طوریکه متوسط بیشینه کرنش های ثبت شده در میله های BMCF با مهار های انتهایی در نمونه های VBA و IBA به ترتیب ۵۲ و ۷۲ درصد نسبت به نمونه های VB و IB افزایش داشته است.

۴- انرژی جذب شده نهایی (متناظر با بار بیشینه) در نمونه های با میله های BMCF مهاردار نسبت به نمونه های با میله های BMCF مستقیم بین ۱/۷۵ تا ۲/۵۴ بدست آمده است. همچنین مشارکت میله های BMCF مهاردار در باربری برشی ۶۰ درصد بیشتر از میله های BMCF مستقیم بوده است.

۵- گسیختگی نهایی در نمونه های VB و IB اغلب ناشی از جداشدگی میله های BMCF بوده است درحالی که در نمونه های VBA و IBA گسیختگی کلی ابتدا بواسطه ترک خوردگی کلی تیر و از دست رفتن مقاومت برشی بتن بوده و سپس میله های BMCF مهاردار به همراه بخش هایی از بتن پوشش آرماتورها از جوانب تیر جدا شده اند.

۶- آرماتورهای برشی فولادی واقع در وسط دهانه ضعیف در همه نمونه ها قبل از گسیختگی نهایی تیر به مرز تسلیم

نتیجه، نتایج تنها برای نمونه های VB و IB که در آنها از میله های BMCF بدون مهار انتهایی استفاده شده است، ارائه می شود. در مورد میله های مهاردار، بر مبنای نتایج مندرج در جدول (۳) می توان گفت این میله ها نسبت به میله های ساده ۶۰ درصد بیشتر در باربری برشی مشارکت نشان می دهند. به عبارتی برای محاسبه میزان مشارکت برشی میله های مهار دار می توان میزان مشارکت برای حالت بدون مهار را محاسبه کرد و نتیجه را در ضریب ۱/۶ ضرب کرد. البته تعمیم این روش نیاز تحقیقاتی بیشتری را طلب می کند و تنها با تکیه بر یافته های تحقیق حاضر نمی توان این روش را تأیید کرد. نتایج مندرج در جدول (۶) حاکی از تخمین قابل قبول و البته تاحدی محافظه کارانه روش تحلیلی پیشنهادی می باشند.

جدول (۶) مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

نام نمونه	نتایج آزمایشگاهی V_f (کیلو نیوتن)	نتایج تحلیلی $V_{f,ana}$ (کیلو نیوتن)	نسبت نتایج تحلیلی به آزمایشگاهی
VB	۳۳/۴۱	۳۱/۸۶	۰/۹۵
IB	۳۹/۸۸	۲۲/۵۲	۰/۵۶

۷- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج آزمایشگاهی تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده در برش به روش NSM با استفاده از میله های ابداعی BMCF به تفصیل ارائه شد. همچنین سیستم مهار انتهایی پیشنهادی برای میله های BMCF مورد ارزیابی قرار گرفت. مهمترین نتایج حاصله به شرح زیر می باشد:

۱- نتایج آزمایش ها نشان دهنده عملکرد مطلوب میله های BMCF ارائه شده در مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح می باشد. همچنین مهار انتهایی ارائه شده برای میله های BMCF باعث بهبود رفتار میله های BMCF شده است.

کیفیت کار را فراهم نمودند تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از شرکت پایا ساز آژند به خاطر فراهم کردن مصالح چسب و اپوکسی تشکر می‌شود.

۹- مراجع

- [1] American Concrete Institute. ACI Committee 440. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures". Farmington Hills, MI: ACI 440.2R-08; 2008.
- [2] Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L. "Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: a state-of-the-art review". Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Structures and Buildings 2003;156(SB1); 51-62.
- [3] Holloway L.C., Teng J.G. "Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites". Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited; 2008.
- [4] El-Ghandour A.A. "Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams". Construction and Building Materials, 2011;25(3):1419-29.
- [5] Chen J.F., Teng J.G. "Shear capacity of FRP strengthened RC beams: fibre reinforced polymer rupture". Journal of Structural Engineering ASCE, 2003;129(5):615-25.
- [6] Chen J.F., Teng J.G. "Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding". Construction and Building Materials, 2003; 17 (1): 27-41.
- [7] Teng J.G., Lam L., Chen J.F. "Shear strengthening of RC beams using FRP composites". Progress in Structural Engineering Material, 2004;6:173-84
- [8] Adhikary B.B, Mutsuyoshi H., Sano M. "Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis". Construction and Building Materials, 2000;14(5):237-44.
- [9] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. "FRP-strengthened RC structures". Chichester, UK:

رسیده‌اند. به هر حال این مطلب تابعی از درصد تسلیح به مصالح FRP و/یا درصد آرماتورهای برشی فولادی موجود در تیر بوده و البته نیاز تحقیقاتی بیشتری در این ارتباط احساس می‌شود.

۷- کاهش سطح مقطع الیاف FRP در محل مهارهای انتهایی میله‌های BMCF در نمونه VBA-W منجر به گسیختگی محل اتصال مهارهای انتهایی به میله‌های BMCF شده است و بهبودی در نتایج نهایی نمونه VBA-W نسبت به نمونه VB مشاهده نشده است. در نتیجه کاهش میزان الیاف FRP در قسمت مهار انتهایی توصیه نمی‌شود.

۸- نتایج بدست آمده در این تحقیق مربوط به مشاهدات حاصل از آزمایش ۶ نمونه تیر بزرگ قیاس بود و به منظور مشخص شدن جنبه‌های مختلف رفتار میله‌ها و مهارهای پیشنهادی و تعمیم نتایج آن، انجام آزمایش‌های تکمیلی با درصدهای مختلف میله‌های BMCF، بررسی اثر مقاومت فشاری بتن بر نتایج حاصله و بررسی استفاده از میله‌های BMCF بر روی تیرهای T شکل به عنوان نیازهای تحقیقاتی آتی قابل طرح می‌باشند.

۹- رابطه تحلیلی پیشنهاد شده توسط Rizzo and DeLorenzis تخمین قابل قبول و البته تا حدی محافظه‌کارانه از میزان مشارکت برشی سیستم NSM-BMCF ارائه کرده است که البته تحقیقات بیشتری در این زمینه مورد نیاز می‌باشد.

در خاتمه یادآور می‌شود میله‌های BMCF پیشنهادی و مهارهای انتهایی آنها در این تحقیق به روش دست ساز ساخته شده‌اند که البته امکان ساخت و تولید ماشینی آن نیز امکان‌پذیر می‌باشد.

۸- تقدیر و تشکر

از جناب آقای پرفسور جیان‌فی چن محقق محترم دانشگاه ادینبرو با نظرات و پیشنهادات موثر خود موجبات بهبود

- [17] Barros J.A.O, Dias S.J.E. "Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams". *Cement and Concrete Composites*, 2006;28(3):276-92.
- [18] Rahal K.N, Rumaih H.A. "Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars". *Engineering Structures*, 2011;33(1):53-62.
- [19] Anwarul-islam A.K.M. "Effective methods of using CFRP bars in shear strengthening of concrete girders". *Engineering Structures*, 2009;31(3):709-14.
- [20] AL-Mhammoud F., Castel A., François R., Tourneur C. "Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods". *Composite Structures*, 2009;91(2):138-47.
- [21] Sharbatdar M.K. "Concrete columns and beams reinforced with FRP bars and grids under monotonic and reversed cyclic loading". PhD Thesis, University of Ottawa, Canada 2003.
- [22] Rizzo A, DeLorenzis L. "Modeling of debonding failure for RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement". *Construction and Building Materials*, 2009; 23(4):1568-77.
- [23] جلالی میثم، شربتدار محمدکاظم، جندقی علایی فرشید. "ساخت و ارائه مهار انتهایی برای میله های پلیمری مسلح به الیاف به منظور مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح". سازمان ثبت اسناد و املاک کشور، اداره ثبت اختراعات. ۷۳۹۱۸، ۱۳۹۰.
- John Wiley and Sons Inc;2002.
- [10] Chen J.F. Teng J.G. "Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete". *Journal of Structural Engineering ASCE*, 2001;127(7):784-91.
- [11] Cao S.Y., Chen J.F., Teng J.G., Hao Z., Chen J. "Debonding in RC beams shear strengthened with complete FRP wraps". *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2005;9(5):417-28.
- [12] De Lorenzis L., Teng J.G. "Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures". *Composites Part B:Engineering*,2007;38:119-43.
- [13] DeLorenzisL., Nanni A. "Characterization of FRP rods as near-surface mounted reinforcement". *Journal of Composites for Construction*, 2001;5(2):114-21.
- [14] Rizzo A., De Lorenzis L. "Behaviour and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement". *Construction and Building Materials*, 2009;23(4):1555-67.
- [15] Dias S.J.E., Barros J.A.O. "Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near surface mounted technique". *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2008;12(3):300-11.
- [16] Dias S.J.E., Barros JAO. "Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates". *Engineering Structures*, 2010;32(2):373-84.