

ویژه نامه نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

مطالعه آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده برای برش با CFRP به روش NSM

حبیب اکبرزاده بنگر^{۱*}، محسن احمدنژاد^۲ و مهدی نوروزی^۳

۱-استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۳-کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

در این تحقیق، رفتار آزمایشگاهی تیر عمیق بتن مسلح که با ورق پلیمر مسلح شده با الیاف کربنی (CFRP) به دو روش نصب خارجی (EB) و روش نصب در شکاف نزدیک سطح (NSM) مقاوم‌سازی برشی شده، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این هدف، ۶ تیر به طول ۱۴۵ سانتی متر، ضخامت ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. آرایش ورق CFRP روی جان همه تیرهای مقاوم‌سازی شده، بصورت قطری و عمود بر خط واصل بین زیر بار تا محل تکیه گاه می باشد. نمونه‌ها به دو گروه با توجه به میزان فولاد مسلح کننده برشی تقسیم می شود؛ هر گروه دارای سه تیر می باشد که تیر اولی تیر کنترل و مقاوم سازی نشده، تیر دوم با روش EB مقاوم سازی شده و تیر سوم با همان مقدار ورق CFRP با روش NSM مقاوم سازی شده است. همه تیرها تا مرحله گسیختگی بارگذاری شده و در حین بارگذاری مقدار کرنش بتن فشاری، کرنش فولاد کششی، عرض ترک و تغییر شکل وسط دهانه تیر اندازه گیری شده است. نتایج آزمایش نشان می دهد که ظرفیت باربری و تغییر شکل نهایی تیرهای مقاوم سازی شده با روش NSM به ترتیب تا ۱۸ درصد و ۱۶ درصد بیشتر از تیر کنترل می باشد. همچنین ظرفیت باربری و تغییر شکل نهایی تیرهای مقاوم سازی شده با روش NSM به ترتیب تا ۶ درصد و ۱۵ درصد بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش EB می باشد. میزان کرنش فشاری بتن در حالت نهایی در ناحیه خمش ثابت در تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش NSM حدود ۵۰ درصد بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش EB می باشد.

کلمات کلیدی: تیر عمیق بتن مسلح، مقاوم سازی برشی، CFRP، EB، NSM

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.81471.1137	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.81471.1137	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۸/۰۴	۱۳۹۶/۰۸/۰۴	۱۳۹۶/۰۷/۲۹	۱۳۹۶/۰۱/۲۰
حبیب اکبرزاده بنگر					*نویسنده مسئول:	
h.akbarzadeh@umz.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Experimental Investigations of RC Deep Beams Strengthened in Shear using NSM CFRP System

Habib Akbarzadeh Bengar^{1*}, Mohsen Ahmadnezhad², Mehdi Noroozi³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, babolsar, Iran

2- Academic Member, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, babolsar, Iran

2- Structure Engineer, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, babolsar, Iran

ABSTRACT

This paper presents the test results of an experimental study that investigates the behavior of RC deep beams strengthened in shear with externally bonded (EB) and near surface mounted (NSM) techniques using CFRP strip. A total of 6 RC deep beams were constructed and tested under four-point bending. Test specimen had a cross section of 150×500 mm and a total length of 1450 mm. This study included two parameters; techniques (NSM and EB) used for strengthening and amount of shear steel reinforcement ratio. All of the strengthened beams have the same CFRP configurations; and CFRP strips were bonded perpendicular to the diagonal connecting the loading and the support points. The specimens were divided into two groups based on the shear steel reinforcement ratio. There were three beams in each group. One of them was a control beam, the rest of the beams in each group were strengthened by EB or NSM techniques. The amount of CFRP strip in EB and NSM techniques is equal. All of the beams were loaded until failure and during the experiment, deflection and compressive strains of concrete, tensile strain of longitudinal steel bar at mid span and crack width of flexural and shear, were measured. The test results showed that shear strengthening of the deep RC beams with NSM technique causes to increase in ultimate load capacity and ultimate deflection capacity by 18% and 16% respectively, compared with the control beam. Also, the ultimate load capacity and ultimate deflection capacity of deep RC beams strengthened with NSM technique are 6% and 15% more than beams strengthened with NSM technique respectively. The concrete compressive strain at ultimate load of deep RC beams strengthened with NSM technique is 50% more than beams strengthened with NSM technique.

ARTICLE INFO

Received: 09/04/2017

Revised: 21/10/2017

Accepted: 26/10/2017

Keywords:

RC deep beam
shear strengthening
CFRP
EB
NSM

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

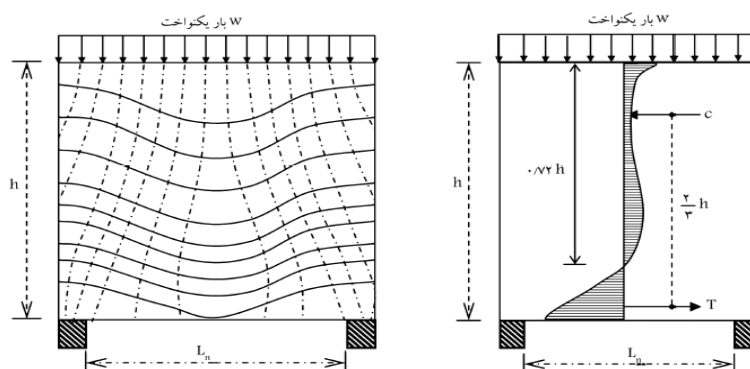
doi: 10.22065/jsce.2017.81471.1137

*Corresponding author: Habib Akbarzadeh Bengar.

Email address: h.akbarzadeh@umz.ac.ir

۱- مقدمه

تیرهای عمیق به دلیل کاربرد وسیع در مهندسی عمران از جمله سیلوهای بتن مسلح، دیوارهای برشی، دال‌های تا شده، سازه‌های دریایی و ساختمان‌های بلند مورد توجه محققین می‌باشد [۱، ۲]. تیرهای عمیق به دلیل هندسه‌ای که دارند، رفتارشان مشابه یک عضو دو بعدی بوده و در حالت تنش مسطح قرار می‌گیرند. مقطع این تیرها قبل از خمش و بعد از خمش الزاماً صفحه باقی نمی‌ماند، زیرا توزیع کرنش در ارتفاع مقطع تیر خطی نبوده و همچنین مقادیر تغییر شکل برشی در مقابل تغییر مکان خمشی قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد [۳]. شکل ۱ توزیع تنش در ارتفاع مقطع و مسیر تنش عمودی برای یک تیر عمیق که از بالا بارگذاری شده را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۱: توزیع تنش در ارتفاع مقطع و مسیر تنش عمودی یک تیر عمیق [۴]

به دلیل رفتار پیچیده این تیرها تعریف دقیقی که مورد تأیید همه مراجع باشد وجود ندارد. ولی اکثر مراجع نسبت دهانه به عمق تیر کمتر از ۵ را به عنوان تیر عمیق می‌شناسند؛ به طوری که آیین‌نامه‌های اروپایی نسبت l/d کمتر از $2/5$ و آیین‌نامه آمریکا این نسبت را ۴ و آیین‌نامه کانادا آن را ۵ در نظر می‌گیرند [۵-۷].

مقاوم‌سازی عناصر اصلی سازه‌های بتن مسلح بنا به دلایلی نظیر افزایش بارهای وارده در دوران بهره‌برداری، آسیب یا از بین رفتن مقاومت سازه و کاستی‌های احتمالی در طراحی و ساخت و از همه مهم‌تر اینکه سازه‌ها بر اساس آیین‌نامه قدیم طراحی شدند و الزامات آیین‌نامه جدید را برآورده نمی‌کنند. ضروری است. برای مقاوم‌سازی و تقویت عضوهای بتن مسلح روش‌های متفاوتی وجود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از افزایش ابعاد مقطع، استفاده از صفحات فولادی، پیش‌تنیدگی خارجی اعضا و اخیراً نیز استفاده از ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) می‌باشد [۸]. استفاده از ورق‌های FRP بخاطر مزایایی که در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح دارد، در سالهای اخیر گسترش یافت. از دلایل استفاده روزافزون از ورق FRP جهت مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح شامل مصونیت در برابر خوردگی، وزن کم (نزدیک به یک چهارم فولاد)، کاربرد آسان‌تر در فضای محدود، کاهش هزینه‌های مربوط به کارگر، مقاومت کششی خیلی بالا، سختی مناسب برای ملزومات طراحی و تنوع در ابعاد و هندسه می‌باشد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲].

یکی از اعضاء سازه‌های بتن مسلح، تیر عمیق می‌باشد که ممکن است بدلیلی که ذکر شده، احتیاج به مقاوم‌سازی داشته باشد. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح با ورق‌های FRP، در رابطه با تیرهای عمیق بتنی تحقیقات کمی صورت گرفته است. اسلام و همکاران نشان دادند که با تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با الیاف FRP به صورت نصب خارجی (EB)، ظرفیت باربری آن را می‌توان تا ۴۰٪ افزایش داد، همچنین آنها نتیجه گرفتند که وقتی ترک‌های قطری اصلی توسط ورق‌های FRP دوخته می‌شود، بهترین نتیجه حاصل می‌شود [۱۳]. ژانگ و همکاران رفتار ۱۶ تیر عمیق بتن مسلح مقاوم‌سازی شده را مورد بررسی قرار دادند. نیمی از تیرها با نسبت دهانه برش به عمق موثر برابر $1/875$ و نیمی دیگر برابر $1/25$ تحت آزمایش قرار گرفتند. تیرها بوسیله ورق‌های FRP با آرایش متفاوت به روش EB مقاوم‌سازی شدند. جهت الیاف ورق FRP در تیرهای مختلف از ۰ تا ۹۰ درجه نسبت به محور تیر تغییر می‌کند. نتیجه

آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت‌سازی با ورق FRP، ظرفیت باربری تیر عمیق را افزایش می‌دهد. وقتی که نسبت دهانه برش به عمق موثر تیر کاهش می‌یابد، مشارکت برش ورق‌های FRP عمود بر محور تیر کاهش می‌یابد، در حالی که سهم برش ورق‌های FRP افقی و با زاویه ۴۵ درجه افزایش می‌یابد. همچنین میزان تنش در ورق‌های FRP در لحظه خرابی تیر عمیق، کمتر از ظرفیت کششی ورق‌های FRP می‌باشد [۱۴]. عربزاده و مهران‌پور رفتار برشی تیرهای عمیق دوسر گیردار مقاومت‌سازی شده بوسیله ورق CFRP به روش EB را بصورت آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند که نتایج به دست آمده حاکی از افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده است. آنها همچنین نتیجه گرفتند که بیشترین افزایش ظرفیت باربری تیر عمیق مربوط به نمونه‌هایی است که ورق CFRP عمود بر ترک برشی نصب شده است [۱۵]. اصغری و همکاران با ساخت ۷ تیر عمیق بتن سبک مسلح و مقاومت‌سازی آنها با ورق‌های FRP به روش EB، تاثیر آرایش FRP را روی افزایش ظرفیت باربری بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که بهترین نوع آرایش در افزایش ظرفیت باربری، نصب FRP بصورت زاویه ۴۵ درجه می‌باشد [۱۶]. برنینگهام و همکارانش رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح که با میله‌های CFRP بصورت خارجی و با پیش تنیدگی مقاومت‌سازی شدند، را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت نهایی تیر نسبت به تیرهای غیر مقاومت‌سازی شده افزایش یافته است [۱۷]. هوسین و پیمان‌ماس، تعداد ۲۹ تیر عمیق بتن مسلح با بازشو که با الیاف SGFRP (اسپری شیشه تقویت شده با الیاف) تقویت شدند را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که با افزایش ضخامت ورق SGFRP، مقاومت برشی افزایش خواهد یافت [۱۸]. عربزاده و همکاران نیز به مطالعه آزمایشگاهی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح پیش تنیده که با FRP به روش EB مقاومت‌سازی شدند، پرداختند و نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اگر تیرهای عمیق معمولی و پیش تنیده با ظرفیت برشی یکسان، با آرایش مناسبی از FRP تقویت شوند، تیر عمیق پیش تنیده تقویت شده شکل پذیری بیشتری داشته و مقاومت نهایی آن حدود ۷٪ بیشتر از تیر عمیق معمولی تقویت شده خواهد بود [۱۹].

همه مراجع ذکر شده در بالا که از ورق FRP جهت مقاومت‌سازی تیر عمیق بتن مسلح استفاده نمودند، روش EB را بکار بردند. لذا در اکثر نمونه‌ها با جدا شدن FRP از سطح بتن، دچار شکست شدند و از همه ظرفیت ورق FRP جهت افزایش ظرفیت باربری استفاده نمی‌شود. یکی از تکنیک‌هایی که در چند سال اخیر جهت بهبود کارایی مقاومت‌سازی خمشی و برشی تیر بتن مسلح معمولی با ورق‌های FRP پیشنهاد شده، مقاومت‌سازی به روش نصب در شکاف نزدیک سطح (NSM) می‌باشد. لذا نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ورق‌های FRP که به روش NSM نصب می‌گردد، کرنش جداشدگی بیشتری نسبت به روش EB تحمل می‌کند و لذا ظرفیت خمشی و برشی تیر را بیشتر افزایش می‌دهد [۱۲، ۲۰-۲۴].

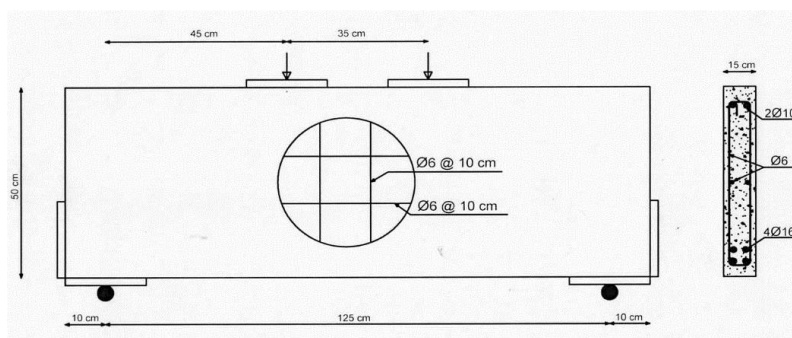
با بررسی انجام گرفته در مراجع مختلف، تا حالا از تکنیک NSM جهت مقاومت‌سازی تیر عمیق بتن مسلح با ورق FRP استفاده نشده است. لذا در این تحقیق، رفتار تیر عمیق بتن مسلح مقاومت‌سازی شده با ورق‌های CFRP به روش NSM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

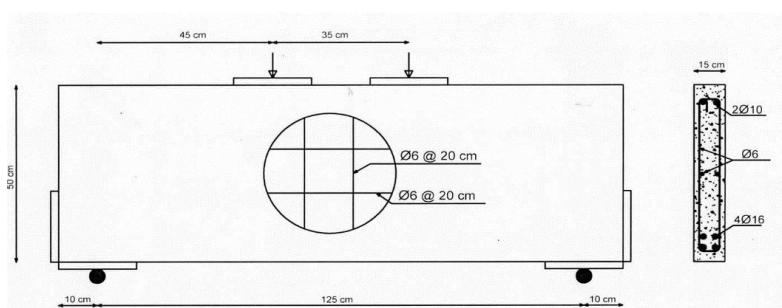
۲-۱- مشخصات تیرهای آزمایش شده

در تحقیق حاضر در مجموع شش تیر عمیق بتن مسلح ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. تمام تیرهای مورد بحث دارای طول ۱۴۵ سانتی متر، ضخامت ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر می‌باشد. برای جلوگیری از تمرکز تنش و لهیدگی تیر در تکیه‌گاه‌ها و نقاط اعمال بار، از صفحات فولادی به ابعاد $10 \times 150 \times 20$ میلی‌متر استفاده شده است. مشخصات کامل ابعاد تیرها و آرایش میلگردهای فولادی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه عرض مقطع تیرها ۱۵ سانتی متر می‌باشد و قلاب کردن همه میلگردهای طولی کششی در انتها تیر اشکالات اجرایی ایجاد می‌کند، لذا از مهار مکانیکی (صفحه فولادی سوراخ دار) برای میلگردهای کششی استفاده شده است. همانطوریکه در شکل ۲ مشخص است دهانه برش برابر ۴۵ سانتی متر می‌باشد که نسب دهانه برش به عمق موثر تیرها برابر با یک می‌باشد، لذا رفتار تیرهای مورد آزمایش بصورت برشی می‌باشد.

جهت بررسی دقیقتر روش مقاومسازی، میزان میلگرد برشی، نوع مقاومسازی و مقدار CFRP بعنوان متغیر در برنامه آزمایشگاهی در نظر گرفته شدند. مشخصات میلگردگذاری و مقاومسازی با ورقهای CFRP تمام تیرهای مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین آرایش ورقهای CFRP روی تیرهای مقاومسازی شده، بصورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجائیکه نتایج تحقیقات پژوهشگران روی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح مقاومسازی شده با FRP نشان می دهد که بهترین آرایش FRP، عمود بودن راستا ورق FRP بر راستا ترکهای برشی (خطی که از محل بارگذاری و تکیه گاه می گذرد) می باشد [۱۳-۱۶]، لذا در این تحقیق از این آرایش جهت مقاومسازی تیرها استفاده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشخص شده است، تیرها به دو گروه اصلی A و B تقسیم شده اند که تفاوت آنها در مقدار میلگرد برشی و مقدار ورقهای CFRP می باشد. در نمونه B مقدار میلگرد برشی و مقدار مساحت CFRP استفاده شده جهت مقاومسازی، نصف نمونه های A می باشد. میزان CFRP استفاده شده جهت مقاومسازی برشی تیرها در هر دو گروه به گونه ای است که از شکست برشی آنها جلوگیری نماید. هر کدام از تیرهای A و B، به سه زیر گروه دیگر تقسیم می شوند که نشان دهنده روش مقاومسازی می باشد: تیرهای که با زیر گروه R نشان داده شده یعنی مقاومسازی نشده و بعنوان تیر کنترل می باشد؛ تیرهای که با زیر گروه E نشان داده شده یعنی با روش EB مقاومسازی شده و تیرهای که با زیر گروه N نشان داده شده یعنی با روش NSM با همان مقدار CFRP در تیرهای E مقاومسازی شده است. دلیل برابر گرفتن مقدار CFRP در روش E و N این است که فقط اثر روش مقاومسازی روی رفتار تیر عمیق بتن مسلح بررسی شود. همانطوریکه شکل ۳ نشان می دهد، طول ورقهای CFRP در همه تیرها مقاومسازی شده با توجه هندسه، ۵۰ سانتیمتر و ۲۵ سانتیمتر می باشد. عبارتی دیگر در تیرهای زیر گروه E، یک ورق ۵۰ سانتیمتری و دو تا ورق ۲۵ سانتیمتری روی سطح بتن نصب می گردد و در تیرهای زیر گروه N، سه ورق ۵۰ سانتیمتری و ۶ تا ورق ۲۵ سانتیمتری در شیار ایجاد شده نصب می گردد.

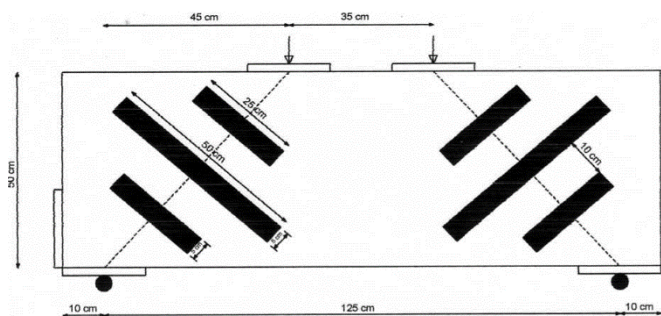


الف) تیر گروه A

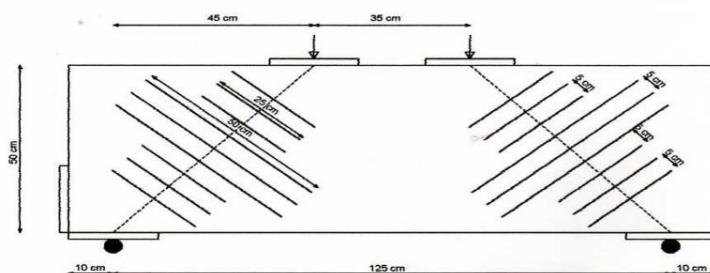


ب) تیر گروه B

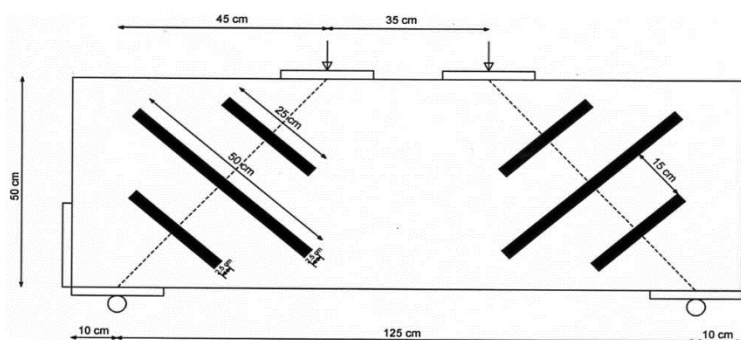
شکل ۲: آرایش میلگردهای تیرها



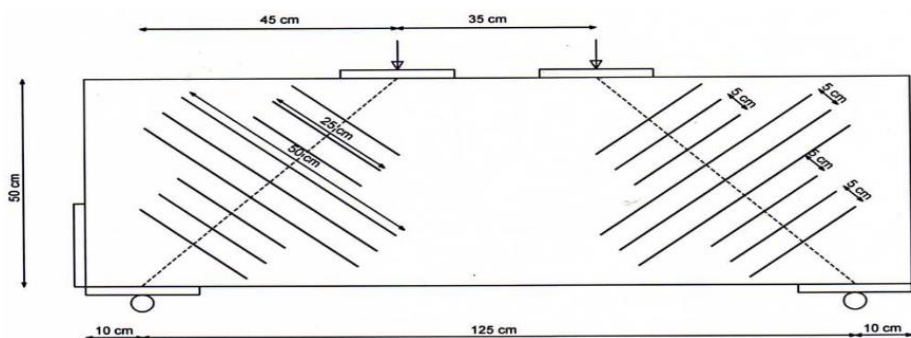
الف. نحوه‌ی قرارگیری ورق CFRP در روی سطح بتن تیر A-E



ب. نحوه‌ی قرارگیری ورق CFRP در شیارهای ایجاد شده در سطح بتن تیر A-N



ج. نحوه‌ی قرارگیری ورق CFRP در روی سطح بتن تیر B-E



د. نحوه‌ی قرارگیری ورق CFRP در شیارهای ایجاد شده در سطح بتن تیر B-N

شکل ۳. نحوه‌ی قرارگیری ورق CFRP در روی سطح بتن تیرهای مقاوم‌سازی شده

جدول ۱: مشخصات تیرهای تقویت شده

f_{cu} N/mm^2	مقدار آرماتور			CFRP		روش تقویت	نمونه
	برشی (افقی و قائم)	فشاری	کششی	عرض (cm)	طول (cm)		
۴۹/۲۸	cm۶@۱۰ φ			-	-	-	A-R
۴۷/۷۳	Cm۶@۲۰ φ			-	-	-	B-R
۴۷/۲	cm۶@۱۰ φ	۱۰ φ۲	۱۶ φ۴	۵	۵۰ و ۲۵	EBR	A-E
۴۶/۵۶	Cm۶@۲۰ φ			۲/۵	۵۰ و ۲۵	EBR	B-E
۴۸/۳۷	cm۶@۱۰ φ			۱/۶۵	۵۰ و ۲۵	NSM	A-N
۴۵/۶۵	Cm۶@۲۰ φ			۰/۶۵	۵۰ و ۲۵	NSM	B-N

۲-۲- مشخصات مصالح استفاده شده و مراحل نصب CFRP

مصالح استفاده شده در ساخت و مقاوم سازی نمونه‌ها عبارتند از فولاد، بتن، چسب اپوکسی و ورق‌های CFRP می‌باشد. آرماتورهای مورد استفاده از نوع آجدار و بر اساس اطلاعات کارخانه‌ی سازنده دارای تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت فشاری مکعبی بتن (f_{cu}) هر یک از تیرهای عمیق در جدول ۱ آورده شده است. چسب اپوکسی استفاده شده جهت چسباندن ورق CFRP به تیرهای عمیق در هر دو روش EB و NSM، Sikadur30 می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. همچنین مشخصات مکانیکی و فیزیکی ورق CFRP جهت مقاوم سازی تیرهای عمیق بتن مسلح در هر دو روش EB و NSM در جدول ۳ آورده شده است. ورق CFRP محصول شرکت Sika می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات چسب اپوکسی

Density (Kg/cm ³)	Compression strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Shear strength (MPa)
1.77	>90	>25	12.8	>15

جدول ۳: مشخصات ورق CFRP

Density (Kg/cm ³)	Thickness (mm)	Ultimate tensile stress f_{fu} (MPa)	Young's Modulus E_{fu} (GPa)	Ultimate strain ϵ_{fu} (%)
1.6	1.2	2800	165	1.7

با توجه به اینکه تیرهای عمیق بتن مسلح به دو روش EB و NSM مقاوم سازی می‌گردند، لذا دو روش مجزا جهت آماده سازی و نصب CFRP انجام گرفت. در روش EB، ابتدا سطح بتن در مکان‌های مشخص، در دو طرف تیر جهت حذف سطح ضعیف توسط سنگ فرز ساب زده شده و سپس جهت تمیز شدن سطح، فرچه سیمی کشیده می‌شود. قبل از بکار بردن چسب Sikadur30 روی سطح بتن، سطح بتن در مکان نصب و سطح ورق CFRP توسط محلول مخصوص تمیز می‌گردد. سپس چسب دو جزئی Sikadur30 مخلوط شده و توسط کاردک در مکان‌های مورد نظر پخش می‌شود و در ادامه ورق‌های CFRP روی چسب قرار گرفته و تحت فشار معینی قرار می‌گیرد. در روش NSM، ابتدا شیارهایی به عرض ۵ میلی‌متر و به عمق ۲/۵ سانتیمتر برای تیر گروه A و به عمق ۱ سانتیمتر برای تیر گروه B در مکان‌های مشخص در دو طرف تیر توسط سنگ فرز ایجاد شده است (شکل ۴.الف). سپس توسط دستگاه پمپ باد و نازل، داخل شیار تمیز گردید. داخل شیار و سطح ورق CFRP قبل از تزریق چسب Sikadur30، توسط محلول مخصوص تمیز می‌گردد. سپس چسب دو جزئی Sikadur30 مخلوط شده و توسط کاردک در شیارها تزریق می‌گردد و در ادامه ورق‌های CFRP با فشار در شیار قرار داده می‌شوند (شکل ۴.ب).



(ب)



(الف)

شکل ۴. (الف) شیار زدن روی سطح جان تیر (ب) نصب ورق CFRP داخل شیار

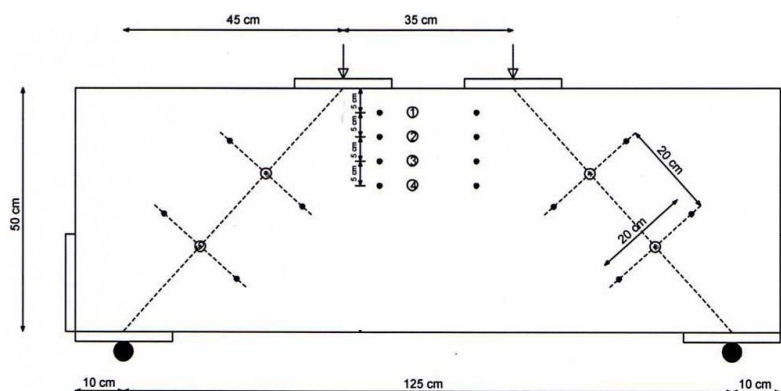
۲-۳-سیستم بارگذاری

نمونه‌ای از سیستم بارگذاری در شکل ۵ نشان داده شده است. تیرها با شرایط تکیه‌گاهی دو سر ساده مورد آزمایش قرار گرفتند. نیروهای وارده به صورت دو نیروی متمرکز توسط جک هیدرولیکی به ظرفیت ۱۰۰ تن در محل‌های مشخص، به نمونه اعمال می‌شود (شکل ۲). جهت اندازه‌گیری میزان نیرو اعمالی از Load Cell در زیر جک بارگذاری و جهت اندازه‌گیری تغییرشکل وسط دهانه تیر از LVDT استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری میزان کرنش فشاری بتن روی سطح بتن بین دو ناحیه بارگذاری در منطقه فشاری، دکمه فلزی با چسب نصب گردید (شکل ۶-الف). در هر گام بارگذاری میزان کرنش فشاری بتن با گذاشتن کرنش سنج مکانیکی روی دکمه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. همچنین جهت کنترل بهتر اندازه‌گیری کرنش فشاری بتن در حین بارگذاری، کرنش سنج الکتریکی روی سطح بتن در منطقه فشاری بین دو ناحیه بارگذاری نصب گردید. برای اندازه‌گیری کرنش فولاد کششی تیرها در حین بارگذاری، قبل از بتن ریزی تیر، روی میلگردهای مورد نظر کرنش سنج الکتریکی نصب گردید (شکل ۶-ب)).

بارگذاری با سرعت ثابت و با گام‌های مشخصی تا مرحله شکست ادامه می‌یابد. جهت ثبت میزان نیرو، تغییرشکل و کرنش به ترتیب Load Cell، LVDT و کرنش سنج‌های الکتریکی به Data Logger متصل می‌گردد. همچنین در هر مرحله بارگذاری، عرض بزرگترین ترک خمشی و برشی با ترک سنج نوری اندازه‌گیری شده و نحوه گسترش ترک‌ها با مائیک علامت‌گذاری شده است. به این منظور سطح تیر قبل از بارگذاری توسط رنگ سفید رنگ‌آمیزی شده تا هر گونه ترک ایجاد شده به راحتی قابل مشاهده باشد.



شکل ۵. نمونه‌ای از سیستم بارگذاری تیر



(الف)



(ب)

شکل ۶: (الف) نصب دکمه‌ها جهت اندازه‌گیری کرنش فشاری بتن (ب) کرنش سنج الکتریکی روی فولاد کششی

۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

اولین ترک‌های ایجاد شده در تیرها، ترک‌های خمشی است که در حدود وسط دهانه اتفاق افتاد. سپس ترک‌های قطری شکل گرفت که از حدود یک چهارم عمق زیر طاق تیر شروع شده و پس از آن به سمت پایین تا انتهای داخلی تکیه‌گاه و به سمت بالا تا منطقه فشاری خمشی گسترش می‌یابند. میزان بار اولین ترک خوردگی خمشی و برشی قطری و میزان بار و نوع شکست نهایی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: بار اولین ترک خمشی، برشی، بار و تغییر شکل نهایی و نوع شکست نهایی

تیر	بار ترک خوردگی خمشی (ton)	بار ترک خوردگی برشی (ton)	بار نهایی (ton)	افزایش بار نهایی نسبت به نمونه غیر مقاوم سازی (%)	تغییر مکان نهایی (mm)	نوع شکست
A-R	۹/۸۹	۱۵/۱۲	۶۳/۵۵	-	۲۴/۴۲	گسیختگی برشی
A-E	۹/۹۹	۱۵/۱۸	۷۳/۵۹	۱۶	۲۴/۶۱	جداشدگی CFRP و خرد شدن بتن در قسمت فشاری
A-N	۱۰/۰۸	۱۴/۹۷	۷۴/۸۲	۱۸	۲۸/۴۶	خرد شدن بتن در قسمت فشاری
B-R	۹/۹۷	۲۰/۲۲	۵۰/۲۲	-	۴۹/۴۱	گسیختگی برشی
B-E	۱۰/۱۰	۲۰/۰۸	۵۴/۶۱	۹	۵۱/۷۰	جداشدگی CFRP و مقداری خرد شدن بتن در قسمت فشاری
B-N	۱۰/۰۱	۲۰/۰۹	۵۷/۵۹	۱۵	۵۶/۰۸	خرد شدن بتن در قسمت فشاری

۳-۱- الگوی ترک‌ها و شیوه شکست تیرها

در تیر A-R، اولین ترک خمشی تحت بار ۹/۸۹ تن اتفاق افتاد، سپس با ادامه بارگذاری، تعداد ترک‌های خمشی افزایش می‌یابد تا اینکه اولین ترک برشی تحت بار ۱۵/۱۲ تن بوجود آمد. با افزایش بار تعداد ترک‌ها و ارتفاع ترک‌های خمشی و برشی افزایش یافته تا اینکه تحت بار ۶۳/۵۵ تن تیر در اثر ترک برشی قطری دچار شکست شد (شکل ۷).



شکل ۷: نحوه ترک خوردگی و شکست تیر A-R

در تیر A-E، اولین ترک خمشی تحت بار ۹/۹۹ تن اتفاق افتاد، سپس با ادامه بارگذاری تعداد ترک‌های خمشی افزایش می‌یابد تا اینکه اولین ترک برشی تحت بار ۱۵/۱۸ تن بوجود آمد. با افزایش بار، تعداد ترک‌ها و ارتفاع ترک‌های خمشی و برشی افزایش یافته تا اینکه تحت

بار ۷۳/۵۹ تن با جداسدن ورق CFRP از روی بتن و خرد شدن بتن در ناحیه فشاری بین دو بار، تیر دچار شکست شد (شکل ۸). بار ترک خمشی و برشی این تیر نسبت به تیر مرجع تغییری نداشته است. اما ظرفیت باربری (بار شکست) این تیر نسبت به تیر مرجع ۱۶ درصد افزایش یافت. بعد از تشکیل ترک‌های برشی قطری، این ترک‌ها توسط ورق‌های CFRP که عمود بر ترک می‌باشد، مهار شده و اجازه گسترش ترک برشی قطری و افزایش عرض آنها را نمی‌دهد، لذا از شکست زودرس برشی تیر جلوگیری شده است و باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شده است.



شکل ۸: نحوه ترک خوردگی و شکست تیر A-E

در تیر A-N، اولین ترک خمشی تحت بار ۱۰/۰۸ تن اتفاق افتاد، سپس با ادامه بارگذاری تعداد ترک‌های خمشی افزایش می‌یابد تا اینکه اولین ترک برشی تحت بار ۱۴/۹۷ تن بوجود آمد. با افزایش بار، تعداد ترک‌ها و ارتفاع ترک‌های خمشی و برشی افزایش یافته تا اینکه تحت بار ۷۴/۸۲ تن با خرد شدن بتن در ناحیه فشاری بین دو بار، تیر دچار شکست شد (شکل ۹). بار ترک خمشی و برشی این تیر نسبت به تیر مرجع تغییری نداشته است. اما ظرفیت باربری (بار شکست) این تیر نسبت به تیر مرجع ۱۸ درصد افزایش یافت. علت افزایش ظرفیت باربری این تیر نسبت به تیر مرجع، همانند تیر A-E، جلوگیری از گسترش و عریض شدن ترک برشی قطری توسط ورق‌های CFRP عمود بر آنها می‌باشد. رفتار تیر A-N در مقایسه با تیر A-E نشان می‌دهد که هر چند ظرفیت تیر مقاوم‌سازی شده با روش NSM مقدار اندکی بیشتر از تیر مقاوم‌سازی شده با روش EBR می‌باشد، اما تیر مقاوم‌سازی شده با روش EB در لحظه نهایی دچار جداسدن ورق‌های CFRP از روی بتن شد در حالیکه در تیر مقاوم‌سازی شده با روش NSM بخاطر درگیری بیشتر ورق CFRP با بتن، جدا شدگی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین عملکرد روش مقاوم‌سازی NSM نسبت به روش EB بهتر می‌باشد.



شکل ۹: نحوه ترک خوردگی و شکست تیر A-N

در تیر B-R، اولین ترک خمشی تحت بار ۹/۹۷ تن اتفاق افتاد، سپس با ادامه بارگذاری تعداد ترک‌های خمشی افزایش می‌یابد تا اینکه اولین ترک برشی تحت بار ۲۰/۲۲ تن بوجود آمد. با افزایش بار تعداد ترک‌ها و ارتفاع ترک‌های خمشی و برشی افزایش یافته تا اینکه تحت بار ۵۰/۲۲ تن تیر در اثر ترک برشی قطری دچار شکست شد، در همین هنگام مقداری خردشدگی بتن در منطقه بتن فشاری اتفاق افتاد (شکل ۱۰). ظرفیت باربری این تیر نسبت به تیر A-R کمتر است؛ بخاطر اینکه نوع شکست این دو تیر برشی قطری می‌باشد و میزان میلگرد برشی تیر B-R کمتر از تیر A-R می‌باشد.



شکل ۱۰: نحوه ترک خوردگی و شکست تیر B-R

در تیر B-E، اولین ترک خمشی تحت بار ۱۰/۱۰ تن اتفاق افتاد، سپس با ادامه بارگذاری تعداد ترک‌های خمشی افزایش می‌یابد تا اینکه اولین ترک برشی تحت بار ۲۰/۰۸ تن بوجود آمد. با افزایش بار، تعداد ترک‌ها و ارتفاع ترک‌های خمشی و برشی افزایش یافته تا اینکه تحت بار ۵۴/۶۱ تن با جداشدن ورق CFRP از روی بتن و مقداری خرد شدن بتن در ناحیه فشاری بین دو بار، تیر دچار شکست شد (شکل ۱۱). بار ترک خمشی و برشی این تیر نسبت به تیر مرجع تغییری نداشته است. اما ظرفیت باربری (بار شکست) این تیر نسبت به تیر مرجع ۹ درصد افزایش یافت. علت افزایش کم ظرفیت باربری، حاکم بودن شکست جداشدگی ورق CFRP از روی بتن می‌باشد که اجازه رسیدن تیر به شکست کامل در اثر خرد شدگی بتن در ناحیه فشاری را نمی‌دهد. بعد از تشکیل ترک‌های برشی قطری، این ترک‌ها توسط ورق‌های CFRP که عمود بر ترک می‌باشد، مهار شده و اجازه گسترش ترک برشی قطری و افزایش عرض آنها را تا حدودی نمی‌دهد.



شکل ۱۱: نحوه ترک خوردگی و شکست تیر B-E

در تیر B-N، اولین ترک خمشی تحت بار ۱۰/۰۱ تن اتفاق افتاد، سپس با ادامه بارگذاری تعداد ترک‌های خمشی افزایش می‌یابد تا اینکه اولین ترک برشی تحت بار ۲۰/۰۹ تن بوجود آمد. با افزایش بار، تعداد ترک‌ها و ارتفاع ترک‌های خمشی و برشی افزایش یافته تا اینکه تحت بار ۵۷/۵۹ تن با خرد شدن بتن در ناحیه فشاری بین دو بار، تیر دچار شکست شد (شکل ۱۲). بار ترک خمشی و برشی این تیر نسبت به تیر مرجع تغییری نداشته است. اما ظرفیت باربری (بار شکست) این تیر نسبت به تیر مرجع ۱۵ درصد افزایش یافت. علت افزایش ظرفیت باربری این تیر نسبت به تیر مرجع، همانند تیر B-E، جلوگیری از گسترش و عریض شدن ترک برشی قطری توسط ورق‌های CFRP عمود بر آنها می‌باشد. رفتار تیر B-N در مقایسه با تیر A-N نشان می‌دهد که ظرفیت تیر مقاوم‌سازی شده با روش NSM بیشتر از تیر مقاوم‌سازی شده با روش EB می‌باشد. این افزایش بخاطر این است که تیر مقاوم‌سازی شده با روش EB در لحظه نهایی دچار جدا شدگی ورق‌های CFRP از روی بتن شد در حالیکه در تیر مقاوم‌سازی شده با روش NSM بخاطر درگیری بیشتر ورق CFRP با بتن، جدا شدگی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین عملکرد روش مقاوم‌سازی NSM نسبت به روش EB بهتر می‌باشد.

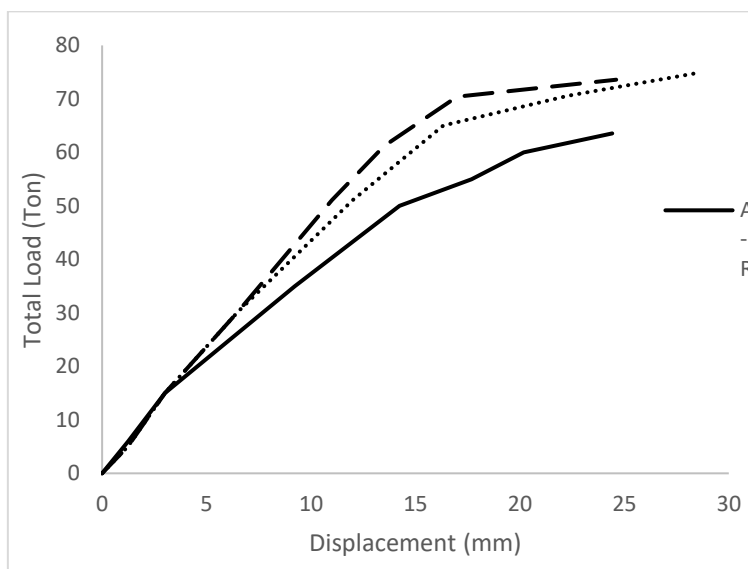


شکل ۱۲: نحوه ترک خوردگی و شکست تیر B- N

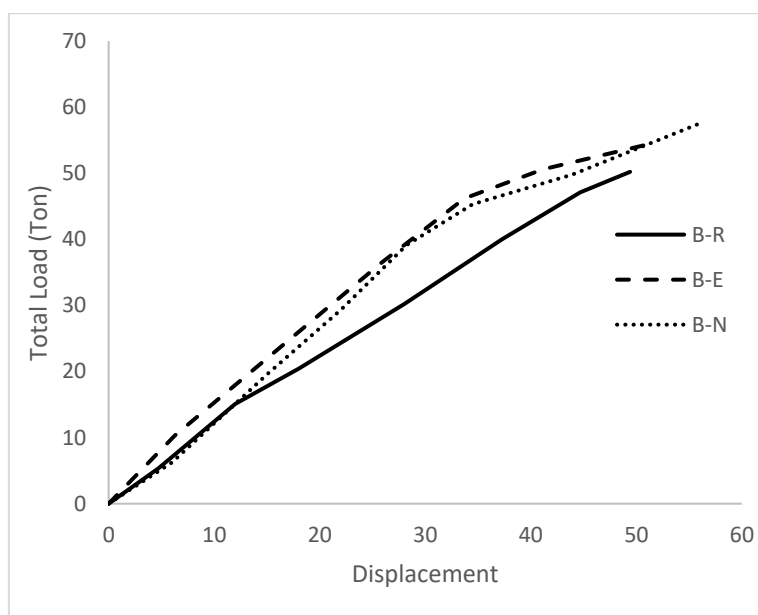
با اینکه مقدار میلگرد برشی و ورق CFRP در تیرهای گروه A و B متفاوت می‌باشد، اما میزان بار ترک خمشی و ترک برشی همه تیرها تقریباً برابر می‌باشد، دلیل این اتفاق این می‌باشد که هم میلگرد برشی و هم ورق CFRP بعد از بوجود آمدن ترک تاثیر گذار می‌باشد.

۳-۲- رفتار بار- تغییر مکان و ظرفیت نهایی تیرها

شکل ۱۳ نمودار بار تغییر مکان وسط دهانه تیرهای آزمایش شده را جهت بررسی رفتار سختی و تغییر مکان نشان می‌دهد. همانطوریکه شکل ۱۳-الف نشان می‌دهد، در تیرهای سری A، در ابتدا بارگذاری سختی تمام تیرهای مقاوم‌سازی نشده و مقاوم‌سازی شده یکسان می‌باشد. دلیل این است که تا زمانی ترک خمشی و مخصوصاً در تیر عمیق ترک برشی اتفاق نیفتد، CFRP وارد عمل نمی‌شود، بنابراین همه تیرها سختی یکسان دارند. بعد از ترک خوردگی مخصوصاً ترک برشی، سختی تیر مقاوم‌سازی نشده کاهش یافت، در حالیکه سختی تیرهای مقاوم‌سازی شده آنچنان کاهش نیافت. بعد از ترک خوردگی تا بار ۵۰ تن تقریباً سختی تیرهای مقاوم‌سازی شده برابر می‌باشد. اما بعد از بار ۵۰ تن، سختی تیر A-E مقداری بیشتر از تیر A-N می‌باشد. این پدیده امکان دارد بخاطر لغزش جزیی بین FRP و بتن باشد که بعد از بار ۵۰ تن اتفاق می‌افتد. بعد از جاری شدن میلگردهای کششی، سختی تمام تیرها به شدت کاهش یافت. اما همچنان بخاطر مقاوم‌سازی با CFRP، سختی تیرهای مقاوم‌سازی شده بیشتر از تیر مقاوم‌سازی نشده می‌باشد. در نهایت بخاطر اینکه تیر مقاوم‌سازی شده با روش NSM دچار شکست جداشدگی ورق CFRP نشده، توانست تغییر مکان بیشتری را تحمل کند که این عامل باعث افزایش شکل‌پذیری این تیر شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳: نمودار بار تغییر مکان وسط دهانه تیرهای (الف) گروه A و (ب) گروه B

شکل ۱۳-ب نشان می دهد که در تیرهای گروه B تا قبل از ترک خوردگی مخصوصا ترک برشی، سختی بار تغییر مکان تمام تیرهای مقاوم سازی نشده و مقاوم سازی شده تقریبا یکسان می باشد. بعد از ترک خوردگی مخصوصا ترک برشی، سختی تیر مقاوم سازی نشده کاهش یافت، در حالیکه سختی تیرهای مقاوم سازی شده آنچنان کاهش نیافت. این شکل نشان می دهد که سختی تیرهای مقاوم سازی شده بعد از ترک خوردگی تقریبا یکسان می باشد. همانند تیرهای گروه A، سختی تیرهای گروه B بعد از جاری شدن میلگرد کششی کاهش می یابد، اما همچنان در این ناحیه سختی تیرهای مقاوم سازی شده از سختی تیرهای مقاوم سازی نشده بیشتر است. در نهایت بخاطر اینکه تیر

مقاوم‌سازی شده با روش NSM دچار شکست جداولی ورق CFRP نشده، توانست تغییر مکان بیشتری را تحمل کند که این عامل باعث افزایش شکل‌پذیری این تیر شده است.

بررسی کلی شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی برشی در تیرهای عمیق به روش‌های NSM و EB باعث افزایش سختی در محدوده رفتار الاستیک تیرها گردیده است. دلیل این افزایش سختی در تیرهای عمیق می‌تواند بخاطر این باشد که چون اکثر تغییرشکل در تیرهای عمیق، برشی می‌باشد، لذا مقاوم‌سازی برشی با ورق CFRP بصورت عمود بر ترک‌های برشی، از باز شدن ترک‌ها جلوگیری کرده، لذا در اثر افزایش بارگذاری آنچنان ممان اینرسی و سطح مقطع بتن نخورده کاهش نمی‌یابد.

در جدول ۴، نتایج ظرفیت باربری نهایی تیرهای آزمایش شده آورده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که تیرهای گروه A در مجموعه نسبت به تیرهای گروه B ظرفیت باربری نهایی بیشتری دارند که بخاطر استفاده از میلگرد برشی بیشتر در تیرهای گروه A می‌باشد؛ هر چند میزان میلگرد خمشی در دو گروه یکسان می‌باشد. از آنجاییکه تیرهای مورد آزمایش عمیق بودند، رفتار آنها برشی می‌باشد، لذا نتیجه قابل انتظار بود. همچنین نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که با مقاوم‌سازی برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با ورق CFRP بصورت عمود بر راستای ترک‌های قطری برشی، ظرفیت نهایی نسبت به تیر مقاوم‌سازی نشده افزایش یافت. مقدار افزایش ظرفیت باربری و تغییرشکل نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش NSM به ترتیب تا حدود ۶ درصد و ۱۵ درصد بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش EBR می‌باشد. که این نتیجه، عملکرد بهتر روش NSM را نسبت به روش EB در مقاوم‌سازی برشی تیر عمیق بتن مسلح نشان می‌دهد.

۳-۳- بررسی عرض ترک، کرنش بتن فشاری و کرنش فولاد کششی

در جدول ۵ مقدار حداکثر عرض ترک خمشی و برشی، حداکثر کرنش فولاد کششی و حداکثر کرنش بتن فشاری در لحظه شکست تیر آورده شده است. همانطوریکه جدول ۵ نشان می‌دهد، فولاد کششی همه تیرها در لحظه شکست، جاری شده است. میزان کرنش فولاد کششی در تیرهایی که مقاوم‌سازی نشده است، مقدار اندکی بیشتر از کرنش جاری شدن فولاد کششی می‌باشد. در حالیکه در تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش EB، مقدار کرنش فولاد کششی خیلی بیشتر از کرنش جاری شدن فولاد می‌باشد و همچنین در تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش NSM، مقدار کرنش فولاد کششی بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش EB می‌باشد. علت این اتفاق را این طور می‌توان توضیح داد که مقاوم‌سازی با ورق CFRP در راستای عمود بر ترک برشی قطری، از شکست برشی جلوگیری کرده و شکست به سمت خمشی سوق می‌دهد و لذا کرنش فولاد کششی در لحظه شکست در این تیرها، مخصوصاً تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش NSM به شدت افزایش می‌یابد که نشان از عملکرد مناسب نوع آرایش مقاوم‌سازی با ورق CFRP و روش NSM می‌باشد.

جدول ۵ نشان می‌دهد که کرنش بتن فشاری در لحظه شکست در تیرهای مقاوم‌سازی نشده خیلی کمتر از کرنش پکیدن بتن فشاری (۰/۰۰۳-۰/۰۳۵) می‌باشد. بخاطر اینکه این تیرها دارای شکست برشی می‌باشد، لذا میزان کرنش فشاری بتن در این تیرها منطقی می‌باشد. در حالیکه در تیرهایی که با روش EB مقاوم‌سازی شده است، میزان کرنش فشاری بتن در لحظه شکست حدود ۰/۰۰۳ می‌باشد یعنی در آستانه پکیدن بتن می‌باشد که با مشاهدات لحظه شکست این تیرها مطابقت دارد. همچنین جدول ۵ نشان می‌دهد که میزان کرنش بتن فشاری در لحظه شکست در تیرهایی که با روش NSM مقاوم‌سازی شده بیشتر از میزان کرنش پکیدن بتن فشاری می‌باشد که با مشاهدات شکست این تیرها که بصورت خمشی می‌باشد، مطابقت دارد. با توجه به اینکه مقاوم‌سازی با ورق CFRP در راستای عمود بر ترک برشی قطری از شکست برشی جلوگیری کرده، شکست به سمت خمشی سوق داده شده و لذا کرنش بتن فشاری در لحظه شکست در این تیرها مخصوصاً تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش NSM به شدت افزایش می‌یابد. میزان کرنش بتن فشاری در لحظه شکست در تیرهای مقاوم‌سازی شده به روش NSM حدود ۵۰ درصد بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش EB می‌باشد. که این نتیجه، عملکرد بهتر روش NSM را نسبت به روش EB در مقاوم‌سازی برشی تیر عمیق بتن مسلح نشان می‌دهد.

همانطوریکه در بالا گفته شده، در هر مرحله از بارگذاری تیرها، عرض بزرگترین ترک خمشی و ترک برشی بصورت جداگانه با استفاده از ترک سنج نوری اندازه گیری شده و ثبت گردید. در جدول ۵ حداکثر عرض ترک خمشی و ترک برشی تیرهای آزمایش شده در بار نهایی آورده شده است. همانطوریکه نتایج جدول نشان می دهد در تیرهایی که مقاوم سازی نشده، عرض ترک برشی بزرگتر از عرض ترک خمشی در لحظه بار نهایی می باشد. در حالیکه در تیرهای مقاوم سازی شده در لحظه بار نهایی، عرض ترک خمشی بیشتر از عرض ترک برشی می باشد. دلیل آنرا می توان اینطور توضیح داد که استفاده از ورق CFRP در جهت عمود بر راستای ترک قطری برشی، بعد از بوجود آمدن ترک قطری برشی از گسترش آن جلوگیری کرده است و با افزایش بار اعمالی و افزایش تغییر شکل تیر، عرض ترک خمشی افزایش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که عملکرد این شیوه آرایش ورق CFRP جهت مقاوم سازی برشی تیر عمیق از کارایی مناسبی برخوردار می باشد.

جدول ۵: عرض ترک و کرنش مصالح در لحظه شکست تیرهای آزمایش شده

نمونه	بار نهایی (ton)	حداکثر عرض ترک خمشی در بار نهایی (mm)	حداکثر عرض ترک برشی در بار نهایی (mm)	کرنش فولاد کششی (mm/mm)	کرنش بتن فشاری (mm/mm)
A-R	۶۳/۵۵	۱/۲۱	۲/۸۱	>۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
A-E	۷۳/۵۹	۳/۱۵	۰/۴۱	>>۰/۰۰۲	۰/۰۰۳
A-N	۷۴/۸۲	۴/۲۷	۱/۰۱	>>>۰/۰۰۲	۰/۰۰۴۷
B-R	۵۰/۲۲	۱/۱۰	۲/۲۵	>۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۸
B-E	۵۴/۶۱	۴/۱۰	۱/۸۴	>>۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۹
B-N	۵۷/۵۹	۶/۰۰	۰/۵۰	>>>۰/۰۰۲	۰/۰۰۴۵

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، رفتار تیر عمیق بتن مسلح مقاوم سازی شده با ورق های CFRP در برش با روش EB و NSM مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق بشرح ذیل می باشد:

۱- در تمام تیرهای آزمایش شده، ابتدا ترک خمشی در وسط دهانه تیر شروع شده و در ادامه بارگذاری، ترک برشی در منطقه برش ثابت اتفاق افتاد. در تیر مقاوم سازی نشده همین ترک برشی باعث شکست تیر شده است. در حالیکه هر دو روش مقاوم سازی از شکست برشی تیر جلوگیری نمودند. در تیرهایی که به روش EB مقاوم سازی شده، در لحظه نهایی ابتدا جداسازی بین ورق CFRP و بتن اتفاق افتاد، در حالیکه تیرهایی که به روش NSM مقاوم سازی شده، در لحظه نهایی جداسازی اتفاق نمی افتد، بلکه تیر دچار شکست خمشی (پکیدن بتن در منطقه فشاری) می شود.

۲- همه تیرهای آزمایش شده (مقاوم سازی نشده و مقاوم سازی شده) تا قبل از ترک برشی دارای سختی تقریباً یکسانی می باشند. بعد از ترک برشی، سختی تیرهای مقاوم سازی نشده کاهش می یابد، در حالیکه سختی تیرهای مقاوم سازی شده به هر دو روش آنچنان کاهش نمی یابد، بنابراین مقاوم سازی تیرهای عمیق با ورق CFRP باعث افزایش سختی در محدوده الاستیک می گردد. اما بعد از جاری شدن میلگردهای کششی سختی همه تیرهای آزمایش شده کاهش می یابد که این کاهش در تیرهای مقاوم سازی شده کمتر می باشد. در لحظه نهایی، تیرهایی که به روش NSM مقاوم سازی شده نسبت به تیرهای که به روش EB مقاوم سازی شده، بخاطر پیوستگی بهتر ورق CFRP به بتن، ۱۵ درصد تغییر مکان بیشتری را تحمل کرده و لذا شکل پذیری بیشتری دارند.

۳- کرنش فولاد کششی تیرهای مقاوم سازی شده در لحظه نهایی خیلی بزرگتر از کرنش جاری شدن فولاد (۰/۰۰۲) می باشد، در حالیکه در تیرهای مقاوم سازی نشده، کرنش فولاد کششی در لحظه نهایی، مقدار ناچیزی بزرگتر از ۰/۰۰۲ می باشد. از طرفی میزان کرنش فولاد کششی در تیرهای مقاوم سازی شده به روش NSM بیشتر از تیرهای مقاوم سازی شده به روش EB می باشد.

۴- کرنش بتن فشاری در تیرهای مقاوم سازی نشده در لحظه نهایی حدود ۰/۰۰۱ می باشد که خیلی کمتر از کرنش نهایی بتن (۰/۰۰۳) پیشنهادی آئین نامه ها می باشد. کرنش بتن فشاری در تیرهای مقاوم سازی شده به روش EB در لحظه نهایی تقریباً ۰/۰۰۳ می باشد که خیلی

بیشتر از تیر مقاوم‌سازی نشده می باشد. در حالیکه بخاطر پیوستگی بهتر ورق CFRP به بتن در تیرهای مقاوم سازی شده به روش NSM، کرنش فشاری بتن در لحظه نهایی حدود $0.045/0$ می باشد که ۵۰ درصد بیشتر از کرنش بتن فشاری در تیرهای EB می باشد.

۵- حداکثر عرض ترک برشی در لحظه نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده خیلی کمتر از تیرهای مقاوم‌سازی نشده می باشد. در حالیکه حداکثر عرض ترک خمشی در لحظه نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی نشده می باشد. لذا مقاوم‌سازی با ورق CFRP از رشد ترک برشی جلوگیری کرده و شکست تیر را به سمت شکست خمشی سوق می دهد.

۶- مقاوم‌سازی برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از ورق CFRP با روش EB و NSM و بصورت عمود بر راستای ترک‌های قطری برشی، ظرفیت بار نهایی را نسبت به تیر مقاوم‌سازی نشده افزایش داده که مقدار افزایش در تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش NSM تا ۱۸ درصد می باشد. از طرفی افزایش ظرفیت بار نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش NSM حدود ۶ درصد بیشتر از تیرهای مقاوم‌سازی شده با روش EB می باشد. این نتیجه، عملکرد بهتر روش NSM را نسبت به روش EB در مقاوم‌سازی برشی تیر عمیق بتن مسلح با ورق CFRP نشان می دهد. از طرفی تیرهای عمیق بتن مسلح که با روش NSM مقاوم‌سازی شده، دارای سطح ظاهری مناسبی می باشد و احتیاج به پوشش خاصی ندارد.

مراجع

- [1] Subedi, N.K., Vardy, A.E. and khota, N. (1986). Reinforced concrete deep beams- some test results. *Magazine of concrete Research*, 38(137):206-219.
- [2] Arabzade, A. and Noori Soola, A. (2014). Investigating Effective Parameters in Shear Strength of Deep Beams without Shear Reinforcement. *Concrete Research*, 7(2):17-30.
- [3] Ershadi, S. (1996). *the investigation of behavior and failure modes of simply supported deep beams with the span to depth ratio between 2 and 3*. Master's thesis, Iran University of Science & Technology.
- [4] Kong, F.K. (1990). *Reinforced Concrete Deep Beams*. Glasgow and London: Blakie and Son Ltd.
- [5] EN 1992-1-1.2004., (2004). *Design of Concrete Structures*. British Standards Institution, London, UK.
- [6] ACI 318-14. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, Michigan, USA.
- [7] CSA A23.3-94. (1994). *Design of concrete structures*. Canadian Standards Association, Toronto, Canada.
- [8] Code No.524, (2010). *Guideline and Details for Seismic Rehabilitation of Existent Building*. Management and Planning Organization, Tehran, Iran.
- [9] Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T. and Lam L. (2002). *FRP strengthened RC structures*. New York: Wiley.
- [10] Balaguru, P., Nanni A. and Giancaspro J. (2009). *FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures*. New York: Taylor and Francis.
- [11] Akbarzadeh H, Maghsoudi A.A. (2010). Experimental investigations and verification of debonding strain of RHSC continuous beams strengthened in flexure with externally bonded FRPs. *Materials and Structures*, 43(6): 815-837.
- [12] Ghasemi, S., Maghsoudi, A.A., Akbarzadeh Bengar, H. and Ronagh, H.R. (2015). *Sagging and Hogging Strengthening of Continuous Unbonded Posttensioned HSC Beams by NSM and EBR*. *Journal of Composite for Construction, ASCE*, 20 (2): 04015056.
- [13] Islam, M.I., Mansur, M.A. and Maalej, M. (2005). Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using externally bonded FRP system. *cement and concrete composites*, 27(3):413-420.
- [14] Zhang, Z., Hsu, C. and Moren, J. (2004) Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using carbon fiber reinforced polymer laminates. *Journal of Composite for Construction, ASCE*, 8(5):403-14.
- [15] Arabzade, A. and Mahanpoor h. (2011). The Experimental Study of the Effect of FRP Laminates on Shear Strength of RC Fixed Ended Deep Beams. *Modares Civil Engineering Journal*, 11(2):69-78.
- [16] Asghari, A., Beygi M.H, Navayineya, B. and Asghai, A. (2011). Evaluation of shear behavior of reinforced lightweight concrete deep beams strengthened with CFRP and GFRP composites. *ASAS Journal*, 13(27):74-85.
- [17] Burningham, C.A., Pantelides, C.P. and Reaveley, L.D. (2015). Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods. *Composite Structures*, 125:256-265.
- [18] Hussain, Q. and Pimanmas, A. (2015). Shear Strengthening of RC Deep Beams with Openings using Sprayed Glass Fiber Reinforced Polymer Composites (SGFRP) : Part 1. Experimental Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(7):2121-2133.

- [19] Arabzade, A., Amani, A. and Mahmoodzadeh, I. (2015). Experimental Study of prestressed RC Deep Beams retrofitted by CFRP. *Modares Civil Engineering Journal*, 15:117-127.
- [20] ACI 440.2R-08, (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded RP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Framington Hills, Michigan, USA.
- [21] El-Gamal, S.E., Al-Nuaimi, A., Al-Saidy, A. and Al-Lawati, A. (2016). Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*, 118:52-62.
- [22] Bilotta A., Ceroni F., Nigro, E. and Pecce, M. (2015). Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures*, 124:163-175.
- [23] Bilotta A., Ceroni F., Nigro E. and Pecce M. (2014). Strain assessment for the design of NSM FRP systems for the strengthening of RC members. *Construction and Building Materials*, 69:143-158.
- [24] Bianco, V., Monti, G. and Barros, J.O.A. (2014). Design formula to evaluate the NSM FRP strips shear strength contribution to a RC beam. *Composites: Part B*, 56:960-971.