

# تقویت تیرهای بتن آرمه به روش ترکیبی EBR و NSM

مهسا صیادمنش<sup>۱</sup>، علی خیرالدین<sup>۲</sup>، محمد سعید کریمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

m.sayadmanesh@semnan.ac.ir

kheyroddin@semnan.ac.ir

mskarimi@semnan.ac.ir

## چکیده:

روش نصب نزدیک سطح (Near Surface Mounted-NSM) یک روش نوین مقاومسازی سازه‌های بتن آرمه است که در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این روش به صورت قرار دادن میلگردهای با مقطع مستطیل یا دایره‌ای شکل داخل شیارهایی نزدیک سطح بتن و سپس پر کردن شیار با چسب مناسب است. روش قدیمی‌تری که برای تقویت سازه‌های بتن آرمه استفاده می‌شود، روش تقویت خارجی (Externally Bounded Reinforcement-EBR) می‌باشد. در این روش، ورق‌های کامپوزیتی FRP به سطحی از سازه که لازم است تقویت شود، با چسب‌های خاصی متصل می‌گردد. هر یک از این دو روش دارای مزایا و معایب منحصر به خود می‌باشند. در این تحقیق رفتار تقویتی ۱۳ نمونه تیر بتن آرمه‌ی مستطیلی که به دو روش ذکر شده تقویت گردیدند، به کمک نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا صحت مدل ساخته شده، از مقایسه‌ی نتایج تحلیل با نتایج آزمایش راشیدی و همکارانش [1] بررسی گردید. سپس حساسیت این دو روش به برخی از پارامترهای موثر بر عملکرد آنها نظیر فاصله، تراکم، مقدار و نیز جنس تقویت‌کننده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، اثر ترکیب دو روش NSM و EBR برای تقویت تیر بتنی بررسی گردید. نتایج میزان افزایش ظرفیت خمشی، شکل پذیری و سختی برای نمونه‌های ذکر شده مقایسه گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده، در روش NSM، استفاده از میلگردهای از جنس فولاد، CFRP و GFRP به ترتیب عملکرد بهتری در تقویت خمشی تیر دارند. افزایش تعداد شیارها و قطر میلگردها در روش NSM و نیز افزایش مساحت ورق‌های کامپوزیتی در روش EBR موجب افزایش ظرفیت خمشی تیر بتنی می‌گردد. در حالت استفاده‌ی ترکیبی از این دو روش، بیشترین افزایش ظرفیت خمشی به میزان ۱۰۹/۹٪ در بین حالت‌های بررسی شده، مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تیر بتن آرمه، روش NSM، روش EBR، تقویت خمشی، روش‌های مقاومسازی.

## ۱. مقدمه

تقویت سازه‌ها یکی از مهمترین دغدغه‌های دانشمندان عرصه عمران در عصر حاضر می‌باشد، زیرا قدمت بسیاری از سازه‌ها و بنا-های تاریخی یا بناهای استراتژی زیاد بوده و خراب شدن آنها آسیب فراوانی به اقتصاد کشورها اعمال می‌کند. از سوی دیگر عمر مفید کوتاه سازه‌ها و بناهای تازه احداث در مناطق نامناسب آب و هوایی موجب شده تا دانشمندان و محققان به فکر جایگزینی مصالح جدید به جای مصالح موجود باشند. در دهه ۸۰ میلادی مهندسان عمران به استفاده از الیاف پلیمری جهت تقویت سازه-های بتنی روی آوردند و از روش تقویت خارجی (EBR) در سطح سازه‌های بتنی استفاده کردند. از مزایای این روش وزن کمتر، نصب آسان و نسبت بالای مقاومت به وزن می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که تقویت خارجی با استفاده از الیاف پلیمری، منجر به افزایش ظرفیت خمشی و دوام و نیز افزایش اندک سختی اجزای بتن‌آرمه می‌شود [2]. تسلیح به روش NSM در سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰ در اروپا با استفاده از میلگردهای فولادی انجام می‌شد. در روش NSM پوشش بتنی و چسب از میلگرد در برابر آسیب‌های فیزیکی و مکانیکی محافظت می‌کنند. همچنین، روش NSM پدیده‌ی جداشدن بتن از عنصر تقویت کننده (Debonding) را به تعویق می‌اندازد. روش NSM و EBR نه تنها برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتن‌آرمه، بلکه برای محافظت و جلوگیری از خوردگی سازه‌های مذکور بسیار موثر می‌باشند [3].

حسن<sup>۲</sup> و ریزکالا<sup>۳</sup> (۲۰۰۴)، مطالعاتی جهت بررسی شرایط اتصال میلگردهای CFRP استفاده شده در روش NSM و بتن انجام دادند. نتایج این آزمایش، کارایی روش NSM در تعمیر و تقویت تیرهای بتنی را نشان داد. بار نهایی و کارایی میلگردهای FRP با افزایش طول میلگردها (Embedment Length) افزایش یافت. هم‌چنین مشاهده گردید طول میلگردهای FRP وابستگی زیادی به ابعاد میلگردها، مشخصات بتن و چسب، نحوه‌ی تسلیح و عرض شیارها دارد. نتایج این تحقیق نشان داد، جنس میلگردهای به‌کار برده شده در روش NSM، اعم از فولادی یا پلیمری تاثیر زیادی در رفتار تقویتی این روش دارد [4]. سلیمان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰) مطالعاتی بر روی رفتار خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با میلگردهای FRP به روش NSM انجام دادند. در تحقیق آنها، اثر درصد فولاد داخلی، طول، قطر و جنس میلگردها بر ظرفیت خمشی و سختی تیر بتنی بررسی گردید [5]. در سال ۲۰۱۱، لی<sup>۵</sup> و همکاران به بررسی اثر مقاومت‌سازی طره دال پل بتنی به روش NSM پرداختند. آنها به مقایسه‌ی رفتار خمشی طره‌های تقویت شده آسیب‌دیده (Precracked) در نواحی لنگر منفی پرداختند. در این تحقیق انواع مختلف تقویت-کننده‌های FRP از نظر شرایط سطح میلگرد (صاف، ناصاف، آجدار، با پوشش ماسه ای، مارپیچ)، شکل مقطع میلگرد (دایره، مربع، مستطیل)، جنس میلگرد (کربن، شیشه) و وضعیت پیش تنیدگی میلگردها مورد بررسی قرار گرفتند. برطبق نتایج بدست آمده در این تحقیق، روش NSM روشی کارآمد در افزایش مقاومت تسلیم و نهایی طره‌های آسیب دیده (Precracked) است [6].

---

Tarek Hassan<sup>۲</sup>  
Sami Rizkalla<sup>۳</sup>  
SM Soliman<sup>۴</sup>  
Dongkeun Lee<sup>۵</sup>

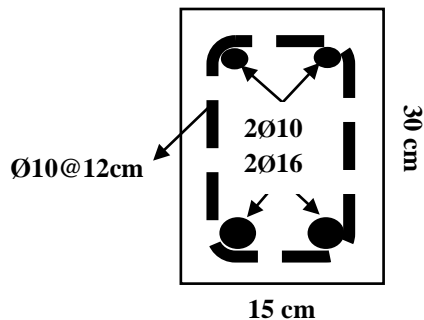
در زمینه‌ی تقویت برشی تیرهای بتن‌آرمه با روش‌های ذکرشده، تحقیقات زیادی توسط بویوک اوزتورک<sup>۶</sup> (۲۰۰۲)، بروس<sup>۷</sup> (۲۰۰۷)، دلورنیز<sup>۸</sup> (۲۰۰۷) و محمدعلی<sup>۹</sup> (۲۰۰۸) انجام شده است که در آنها اثر عمق تیر، میزان آرماتورهای طولی، فاصله و زاویه الیاف، مشخصات مکانیکی چسب و ... بر ظرفیت برشی و مکانیزم‌های شکست بررسی گردیده است [7]، [8]، [9]، [10].

## ۲. تحلیل به روش اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS

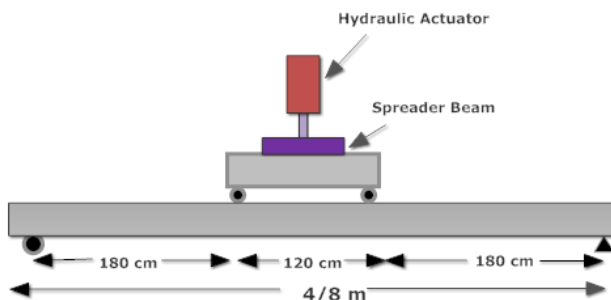
در این تحقیق ۱۳ نمونه تیر بتن‌آرمه که به دو روش NSM و EBR تقویت شدند، مورد بررسی قرار گرفت. مدل پایه برای تیر بتنی، تیر بتن‌آرمه‌ی ساده با آرماتورهای کششی و فشاری (بدون تقویت خارجی و NSM) بوده که در نمونه‌های بعدی همراه با روش‌های تقویتی مورد بررسی قرار گرفته است. این تیر با عنوان "تیر کنترل" نام‌گذاری شده است (B۱). به‌منظور ارزیابی صحت و دقت نتایج خروجی مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس، مشخصات فنی و هندسی تیر کنترل مطابق با نمونه‌های آزمایش Rasheed و همکارانش [1]، انتخاب گردید تا خروجی‌های نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردد. بر این اساس، ابعاد مقطع تیر بتنی مستطیلی ۳۰\*۱۵ سانتی‌متر و طول آن ۴/۸ متر می‌باشد. نحوه‌ی آرماتورگذاری در شکل (۱) نشان داده شده است. میزان پوشش بتنی (Cover) برابر ۲/۵ سانتی‌متر و فاصله‌ی خاموت‌ها ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ی استوانه‌ای بتنی ۵۵ MPa و تنش تسلیم میلگردهای فولادی استفاده شده ۴۸۳ MPa در نظر گرفته شد. مشخصات سایر مصالح در جدول (۱) نشان داده شده است. بارگذاری بر روی تیرها به‌صورت خمش چهارنقطه‌ای بوده است. برای شبیه‌سازی بارگذاری آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS، روش کنترل تغییر مکان به‌کار گرفته شد.

---

<sup>۶</sup> Oral Buyukozturk  
<sup>۷</sup> Barros Joaquim  
<sup>۸</sup> Laura De Loreniz  
<sup>۹</sup> Mohamed Ali Sadakattulla



شکل (۱): نحوه‌ی آرماتورگذاری در نمونه‌ها



شکل (۲): نحوه‌ی بارگذاری در نمونه‌ها

جدول (۱): مشخصات مکانیکی مواد به کار رفته در مدل		
پارامتر (Mpa)		
۵۵	مقاومت فشاری	بتن
۲۹۴۷۳	مدول الاستیسیته	
۰/۰۰۴	کرنش نهایی	
۴۸۳	مقاومت کششی	فولاد
۲۰۰۰۰۰	مدول الانستیسیتیه	
۰/۲۱۵	کرنش نهایی	
۷۵۸/۴	مقاومت کششی	CFRP
۶۰۰۰۰	مدول الاستیسیته	
۰/۰۱۳	کرنش نهایی	
۵۷۵	مقاومت کششی	GFRP
۲۶۱۰۰	مدول الاستیسیته	
۰/۰۱۷	کرنش نهایی	
۶۲	مقاومت کششی	Epoxy
۳۴۵۰۰	مدول الاستیسیته	
۰/۰۵	کرنش نهایی	

## ۱.۲. تقویت به روش نصب نزدیک سطح (NSM)

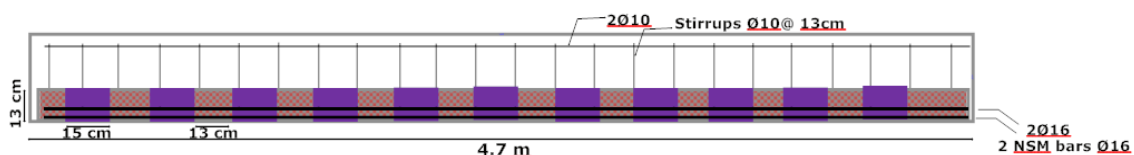
در مرحله‌ی دوم، مقاوم‌سازی بخش کششی بتن به روش نصب نزدیک سطح (NSM) انجام شد. در ابتدا دو شیار به عرض و ارتفاع ۲ سانتی‌متر در طول سطح پایینی تیر ایجاد شد و دو میلگرد فولادی شماره ۱۶ در داخل این شیارها قرار داده شد و سپس داخل شیار با چسب اپوکسی پر شد (نمونه B۲). در این تحقیق اتصال بین میلگرد NSM و چسب اپوکسی و نیز اتصال بین اپوکسی و بتن ایده آل در نظر گرفته شده است. سپس مانند حالت قبل تیر تحت بارگذاری قائم استاتیکی قرار گرفت و نتایج بار و تغییر مکان در وسط تیر استخراج گردید. در حالت دیگر، قطر میلگرد تقویتی NSM را به نصف کاهش داده و به جای میلگرد شماره ۱۶ در نمونه‌ی B۲، از میلگرد فولادی به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شد (نمونه B۳). به منظور بررسی اثر تغییر جنس میلگرد تقویتی NSM بر ظرفیت خمشی تیر، میلگردهای تقویتی به ترتیب از جنس کامپوزیت GFRP و CFRP به جای میلگرد فولادی در نمونه‌ی B۳، داخل تیر قرار داده شد (نمونه‌های B۴ و B۵). در حالت دیگر، اثر تغییر عرض و تعداد شیارها در روش NSM بر روی ظرفیت خمشی تیر مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور یکبار عرض شیارها از ۲ سانتی‌متر به ۴ سانتی‌متر افزایش داده شد و همراه با ثابت ماندن سایر مشخصات، تیر تحت بارگذاری قرار گرفت (نمونه‌ی B۶). همچنین رفتار تیر به هنگام تغییر تعداد شیارها (با عرض ثابت ۲ سانتی‌متر) به یک و سه مورد بررسی قرار گرفت (نمونه‌ی B۷ و B۸).

## ۲.۲. تقویت خارجی (EBR)

در این قسمت رفتار تیر بتنی تحت تقویت خارجی (به روش EBR) بررسی گردید. در حالت اول، یک لایه ورق کامپوزیتی از جنس فایبر گلاس (GFRP) به طول ۴/۵ متر و عرض ۴۰/۵ سانتی‌متر با استفاده از چسب اپوکسی به بخش پایینی تیر کنترل چسبانده شد (نمونه‌ی B۹). سپس مشابه قبل، رفتار تیر تحت بارگذاری استاتیکی بررسی شد. این مراحل برای تیر تقویت‌شده با ورق کامپوزیتی از جنس CFRP بار دیگر تکرار شد (نمونه‌ی B۱۰). در حالت دیگر، اثر تغییر مقدار مواد کامپوزیتی تقویتی بر روی رفتار خمشی تیر مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا مساحت ورق GFRP به ۵۰٪ کاهش داده شد، بدین صورت که با ثابت در نظر گرفتن عرض و ارتفاع ورق، طول آن نصف گردید و به بخش میانی تیر مانند حالت قبل چسبانده شد (نمونه‌ی B۱۱). در حالتی دیگر، به جای آن که ورق GFRP به صورت یک تکه به تیر چسبانده شود (مانند نمونه‌ی B۱۱)، به صورت ورق‌های U-شکل به عرض ۴۰/۵ سانتی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر و به فاصله‌های ۱۲ سانتی‌متر به بخش میانی تیر چسبانده شد (نمونه‌ی B۱۲).

## ۳.۲. تقویت به روش ترکیبی EBR و NSM

در پایان، اثر استفاده از ترکیب دو روش EBR و NSM که به صورت جداگانه در نمونه‌های قبل استفاده گردیدند، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ی B۱۳ به روش NSM به همان صورت به کار گرفته شده برای نمونه‌ی B۲، به اضافه یک لایه ورق GFRP چسبیده شده در تمام طول بخش پایینی (مشابه نمونه‌ی B۹)، تقویت گردید. برای مهار بیشتر، ۱۵ تکه ورق U-شکل از جنس GFRP به فواصل ۱۲ سانتی‌متر بر روی ورق GFRP مطابق شکل (۳) متصل گردید.



شکل (۳): جزئیات نحوه‌ی چسباندن ورقه‌های کامپوزیتی

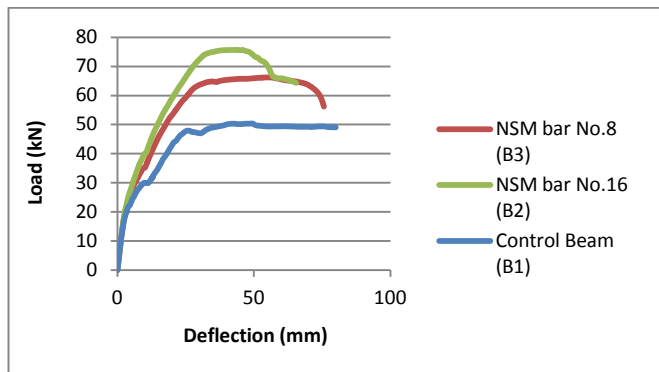
جدول (۲): جزئیات نحوه‌ی تقویت نمونه‌های مختلف در تحقیق حاضر

	روش تقویتی	جنس	ابعاد	توضیحات
B <sub>1</sub>	-	-	-	تیر کنترل
B <sub>2</sub>	NSM	Steel	۲Ø۱۶	عرض شیار = ۲cm
B <sub>3</sub>	NSM	Steel	۲Ø۸	عرض شیار = ۲cm
B <sub>4</sub>	NSM	GFRP	۲Ø۱۶	عرض شیار = ۲cm
B <sub>5</sub>	NSM	CFRP	۲Ø۱۶	عرض شیار = ۲cm
B <sub>6</sub>	NSM	Steel	۲Ø۱۶	عرض شیار = ۴cm
B <sub>7</sub>	NSM	Steel	۱Ø۱۶	عرض شیار = ۲cm
B <sub>8</sub>	NSM	Steel	۳Ø۱۶	عرض شیار = ۲cm
B <sub>9</sub>	EBR	GFRP	۴/۷m * ۴۰cm	ورق پیوسته
B <sub>10</sub>	EBR	CFRP	۴/۷m * ۴۰cm	ورق پیوسته
B <sub>11</sub>	EBR	GFRP	۲/۳۵ m * ۴۰cm	ورق پیوسته
B <sub>12</sub>	EBR	GFRP	۲/۳۵ m * ۴۰cm	ورق های u-شکل
B <sub>13</sub>	EBR+NSM	Steel , GFRP	۲Ø۱۶ ۴/۷m * ۴۰cm ۲/۳۵m * ۴۰cm	عرض شیار = ۲cm ورق پیوسته + ورق های u-شکل

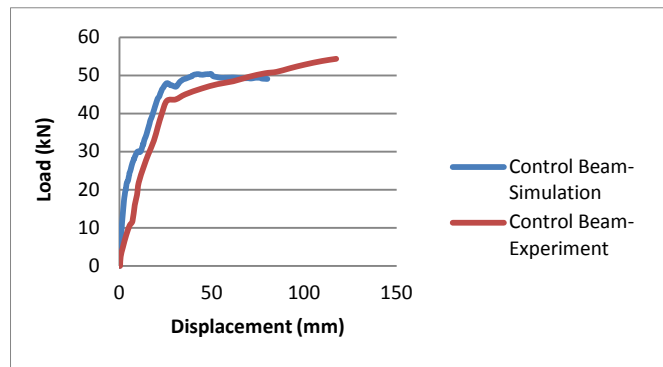
## ۳. نتایج

برای نمونه‌ی R<sub>1</sub> (تیر کنترل)، نتایج نیرو و جابه‌جایی در وسط تیر در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار مشاهده می‌گردد، بار بیشینه تیر کنترل (R<sub>1</sub>) حاصل از خروجی نرم‌افزار آباکوس مقدار ۵۰/۴ کیلونیوتن بوده که به مقدار گزارش شده در آزمایش Rasheed و همکارانش [1] (۵۴/۳ kN) بسیار نزدیک است (اختلاف ۰/۷٪). بر طبق مقادیر بیشینه تنش و کرنش مشاهده شده برای بتن و فولاد، شکست تیر با شکست بتن فشاری و نیز تسلیم فولاد کششی همراه بوده است. این نتایج با گزارشات ارائه شده برای نمونه‌ی آزمایشگاهی کاملاً مطابقت دارد (شکل ۴).

همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود، در نمونه‌ی تقویت‌شده NSM با میلگرد فولادی شماره ۱۶ (B<sub>2</sub>)، مقدار بار بیشینه ۷۵/۷ کیلونیوتن مشاهده گردید که بیانگر افزایش ظرفیت خمشی به میزان ۵۰/۱٪ تیر می‌باشد. در نمونه‌ی تقویت‌شده NSM با میلگرد فولادی شماره ۸ (B<sub>3</sub>)، مقدار بار بیشینه ۶۶/۲ کیلونیوتن بوده و میزان افزایش ظرفیت خمشی ۳۱/۳٪ مشاهده گردید. شکست در هر دو نمونه (B<sub>2</sub> و B<sub>3</sub>) با خرد شدن بتن فشاری و تسلیم آرماتورهای کششی و نیز میلگرد تقویتی NSM همراه بود.

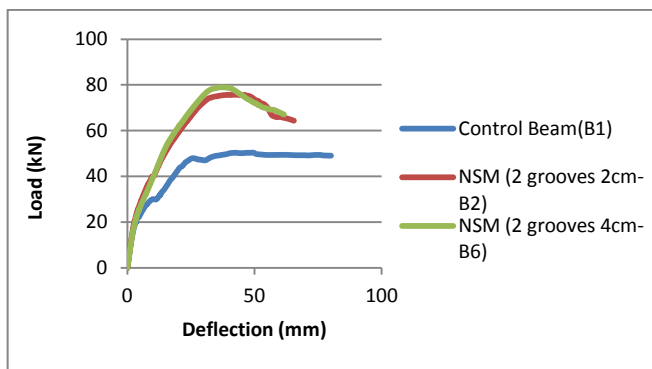


شکل (۵): اثر قطر میلگرد NSM بر بار نهایی وسط تیر

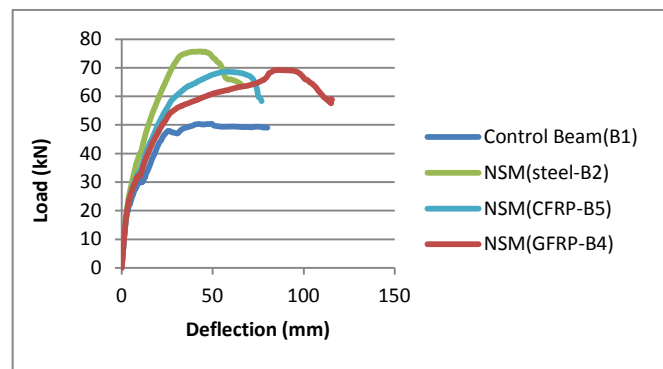


شکل (۴): نمودار نیرو- تغییر مکان برای تیر کنترل (B1)

بر طبق نتایج بدست آمده، مقدار بار نهایی برای نمونه‌های تقویت‌شده NSM از جنس CFRP و GFRP (نمونه‌های B۴ و B۵) به ترتیب ۶۹/۲ kN و ۶۸/۶ kN و میزان افزایش بیشینه بار تیر به ترتیب ۳۷/۳٪ و ۳۶/۱٪ تیر می باشد (شکل ۶). مد شکست تیر بتنی B۴ و B۵ به صورت خرد شدن بتن فشاری با تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری همراه بود. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، استفاده از میلگرد فولادی سبب بیشترین افزایش در ظرفیت خمشی تیر می‌گردد. علت این مساله بیشتر بودن قابل ملاحظه مدول الاستیسیته فولاد در مقایسه با مواد کامپوزیتی استفاده شده در این تحقیق می‌باشد. همان‌طور که از نمودار شکل (۷) دیده می‌شود، افزایش عرض شیار در نمونه‌ی B۶ موجب افزایش چندان‌ی در بار نهایی تیر نمی‌گردد. علت این مساله ممکن است کامل در نظر گرفتن اتصال بتن و اپوکسی در نمونه‌ی مورد بررسی در این تحقیق باشد. در این حالت، شکست تیر با خرد شدن بتن فشاری همراه با تسلیم آرماتورهای کششی و نیز میلگرد تقویتی NSM همراه بود (همانند نمونه‌ی B۲).



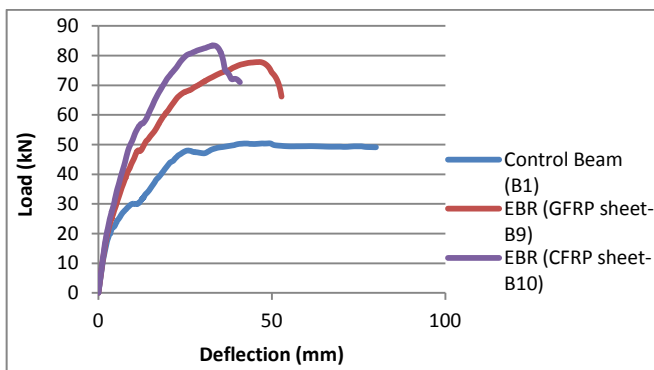
شکل (۷): اثر تغییر عرض شیار در روش NSM بر بار نهایی وسط تیر



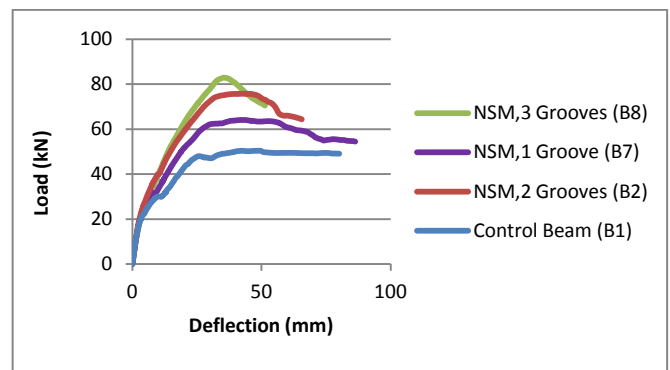
شکل (۶): اثر جنس میلگرد تقویتی NSM بر روی بار نهایی

در صورت استفاده از یک عدد میلگرد تقویتی NSM (نمونه‌ی B۷)، میزان بار بیشینه ۶۴ kN و در صورت استفاده از سه میلگرد تقویتی (نمونه‌ی B۸)، ۸۲/۸ kN مشاهده گردید (شکل ۸). درصد افزایش بار نهایی در وسط تیر نسبت به تیر کنترل در این دو حالت به ترتیب ۲۶/۹٪ و ۶۴/۲٪ می‌باشد.

نتایج خروجی نرم‌افزار آباکوس برای نمونه‌های تقویت شده به روش EBR در شکل (۹) نشان داده شده است. بار بیشینه برای نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های CFRP و GFRP (نمونه‌های B۹ و B۱۰) به ترتیب ۷۷/۸ kN و ۸۳/۴ kN است که نشانگر ۵۴/۳٪ و ۶۵/۴٪ افزایش در مقدار بار بیشینه در وسط تیر می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹) نیز دیده می‌شود، ورق CFRP به دلیل مقاومت کششی بیشتر، عملکرد بهتری در افزایش ظرفیت خمشی نسبت به ورق GFRP دارد. شکست تیر در نمونه‌های B۹ و B۱۰ با خردشدگی بتن فشاری و تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری اتفاق افتاد. همچنین در نمونه‌ی B۱۰ شکست ورق CFRP مشاهده گردید.



شکل (۹): اثر جنس ورقه‌های کامپوزیتی در روش EBR بر بار نهایی وسط تیر

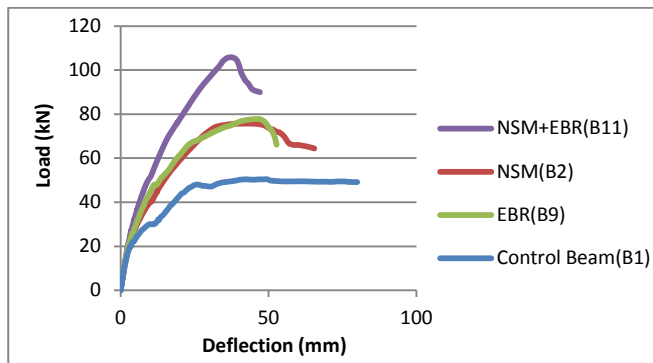


شکل (۸): اثر تعداد شیار NSM بر بار نهایی وسط تیر

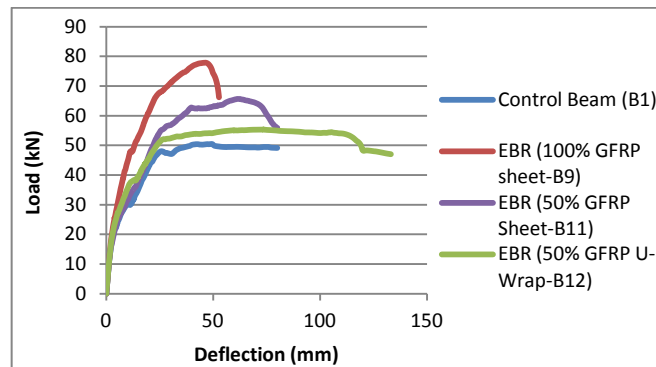
بر طبق نتایج بدست آمده در نرم‌افزار آباکوس، در صورت کاهش مقدار ورق تقویتی GFRP به میزان ۵۰٪ (نمونه B۱۱)، مقدار بار بیشینه وسط تیر ۶۵/۶ kN و درصد افزایش بار بیشینه نسبت به تیر کنترل ۳۰/۱٪ می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از ورق‌های تقویتی GFRP به صورت U-شکل (نمونه B۱۲)، مقدار بار بیشینه وسط تیر ۵۵/۳ kN و درصد افزایش بار بیشینه نسبت به تیر کنترل ۹/۷٪ می‌باشد شکل (۱۰). نتایج ذکر شده نشان می‌دهد در صورتی که از ورق GFRP به صورت یک‌تکه استفاده نشود، تاثیر چندانی بر بهبود ظرفیت خمشی تیر نخواهد داشت. علت این امر می‌تواند عدم ایجاد محصور شدگی لازم برای تیر در این حالت باشد. شکست تیر در نمونه‌های B۱۱ و B۱۲ همراه با خردشدگی بتن فشاری و تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری همراه بود. اثری از تسلیم در ورق GFRP مشاهده نگردید.

نتایج بدست آمده از نرم‌افزار آباکوس برای نمونه‌ی B۱۳ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. از این نمودار می‌توان دریافت که استفاده ترکیبی از دو روش NSM و EBR اثر بسیار مطلوب‌تری را بر ظرفیت خمشی تیر خواهد داشت. بر طبق نتایج بدست آمده در این حالت، میزان افزایش بار بیشینه ۱۰۹/۹٪ (۱۰۵/۸ kN) نسبت به تیر کنترل می‌باشد. شکست تیر همراه با خرد شدن بتن فشاری، تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری همراه بود.





شکل (۱۱): اثر به کار بردن ترکیبی روش NSM و EBR بر بار نهایی در وسط تیر



شکل (۱۰): اثر مقدار ورق کامپوزیتی بر بار نهایی وسط تیر

جدول (۳): نتایج بار بیشینه و نوع شکست برای نمونه‌های تحلیل شده در نرم‌افزار ABAQUS

روش تقویتی	شماره تیر	$P_{max}$ (kN)	درصد افزایش بار (%)	مد شکست
-	تیر کنترل B <sub>۱</sub>	۵۰/۴	-	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم فولاد کششی
NSM	B <sub>۲</sub>	۷۵/۷	۵۰/۱	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم فولاد کششی، فشاری و میلگرد NSM
	B <sub>۳</sub>	۶۶/۲	۳۱/۳	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم فولاد کششی، فشاری و میلگرد NSM
	B <sub>۴</sub>	۶۹/۲	۳۷/۳	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری
	B <sub>۵</sub>	۶۸/۶	۳۶/۱	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری
	B <sub>۶</sub>	۷۸/۹	۵۶/۵	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم فولاد کششی، فشاری و میلگرد NSM
	B <sub>۷</sub>	۶۴	۲۶/۹	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم فولاد کششی، فشاری و میلگرد NSM
	EB	B <sub>۸</sub>	۸۲/۸	۶۴/۲
B <sub>۹</sub>		۷۷/۸	۵۴/۳	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری
B <sub>۱۰</sub>		۸۳/۴	۶۵/۴	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری - شکست ورق CFRP
B <sub>۱۱</sub>		۶۵/۶	۳۰/۱	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری
B <sub>۱۲</sub>		۵۵/۳	۹/۷	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری
B <sub>۱۳</sub>		۱۰۵/۸	۱۰۹/۹	خرد شدن بتن فشاری - تسلیم فولاد کششی، فشاری

جدول (۴): نتایج شکل‌پذیری و سختی برای نمونه‌های تحلیل شده در نرم‌افزار ABAQUS

	$\Delta_y$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\mu_{\Delta}$ $= \Delta_u / \Delta_y$	درصد افزایش یا کاهش $\mu_{\Delta}$	$k = P_y / \Delta_y$ (kN/mm)	درصد افزایش $k$
B1	۱۲/۰۵	۳۰/۷۶	۸۰/۰۰	۴۲/۸۴	۶/۶۳	-	۲/۵۵	-
B2	۱۷/۸۷	۵۵/۷۱	۶۵/۴۷	۶۴/۳۶	۳/۶۶	-۴۴/۷	۳/۱۱	۲۱/۹
B3	۱۶/۲۵	۴۷/۷۳	۷۵/۶۱	۵۶/۱۷	۴/۶۵	-۲۹/۸	۲/۹۳	۱۴/۹
B4	۱۸/۷۲	۴۵/۹۳	۱۱۵/۶۳	۵۸/۸۶	۶/۱۷	-۶/۹	۲/۴۵	-۳/۹
B5	۱۷/۹۹	۴۷/۲۲	۷۶/۸۴	۵۸/۳۴	۴/۲۷	-۳۵/۵	۲/۶۲	۲/۷
B6	۲۰/۲۸	۶۲/۰۵	۶۱/۵۵	۶۷/۱۳	۳/۰۳	-۵۴/۲	۳/۰۵	۱۹/۶
B7	۱۵/۶۴	۴۴/۴۶	۸۶/۲۴	۵۴/۴۵	۵/۵۱	-۱۶/۸	۲/۸۴	۱۱/۳
B8	۲۰/۸۳	۶۴/۳۱	۵۱/۳۲	۷۰/۵۰	۲/۴۶	-۶۲/۸	۳/۰۸	۲۰/۷
B9	۱۶/۴۱	۵۵/۰۲	۵۲/۷۳	۶۶/۱۷	۳/۲۱	-۵۱/۵	۳/۳۵	۳۱/۳
B10	۱۵/۲۶	۶۲/۴۴	۴۰/۷۴	۷۱/۰۱	۲/۶۶	-۵۹/۸	۴/۰۹	۶۰/۳
B11	۱۸/۰۳	۴۳	۸۰/۰۰	۵۵/۹۱	۴/۴۳	-۳۳/۱	۲/۳۹	-۶/۲
B12	۱۲/۵۰	۳۸/۱۳	۱۳۳/۱۲	۴۷/۰۵	۱۰/۶۴	۶۰/۴	۳/۰۵	۱۹/۶
B13	۲۱/۸۷	۸۱/۷۴	۴۷/۰۹	۹۰/۰۰	۲/۱۵	-۶۷/۵	۳/۷۳	۴۶/۲

#### ۴. نتیجه‌گیری

روش نصب نزدیک سطح (Near Surface Mounted-NSM) و تقویت خارجی (EBR)، از روش‌های رایج مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه می‌باشند. هر یک از این روش‌ها می‌تواند به صورت جداگانه و یا به صورت ترکیبی برای تقویت مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، رفتار تقویتی ۱۳ نمونه تیر بتن‌آرمه‌ی مستطیلی که به دو روش ذکر شده تقویت گردیدند، به کمک نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ی نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر به صورت زیر می‌باشد:

- استفاده از میلگرد فولادی در روش NSM، باعث بیشترین افزایش در ظرفیت خمشی تیر می‌گردد (تا ۵۰/۱٪). بعد از فولاد به ترتیب میلگردهای به جنس CFRP و GFRP باعث ۳۷/۳٪ و ۳۱/۳٪ افزایش ظرفیت خمشی تیر می‌گردند.
- در صورت کاهش قطر فولاد به کار رفته در روش NSM به میزان ۵۰٪، میزان افزایش بار نیز در حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد.
- افزایش عرض شیارها در روش NSM، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار افزایش ظرفیت خمشی تیر ندارد. علت این مساله ممکن است کامل در نظر گرفتن اتصال بین بتن و اپوکسی در نمونه‌ی مورد بررسی در این تحقیق باشد.
- افزایش تعداد شیارها در روش NSM موجب افزایش بیشتر ظرفیت خمشی تیر بتنی می‌گردد. مقادیر افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل (B1)، برای یک و دو و سه شیار به ترتیب ۲۶/۹٪، ۵۰/۱٪ و ۶۴/۲٪ می‌باشد.

- در روش تقویت خارجی (EBR)، در صورت استفاده از ورق کامپوزیتی به جنس CFRP، میزان افزایش ظرفیت باربری ۶۵/۴٪ و در صورت استفاده از ورق GFRP، میزان افزایش ظرفیت باربری ۵۴/۳٪ مشاهده گردید. در نتیجه استفاده از ورق کامپوزیتی از جنس CFRP اثر مطلوب‌تری نسبت به GFRP در افزایش ظرفیت خمشی تیر دارد. علت این مساله، بالاتر بودن مدول الاستیسیته و تنش نهایی CFRP پیش‌بینی می‌گردد.
- در صورت استفاده از ورق GFRP به صورت تکه ورق‌های U-شکل، اثر بسیار ناچیزی بر بهبود ظرفیت خمشی مشاهده گردید. علت این امر می‌تواند عدم ایجاد محصورشدگی کافی در محیط تیر بتنی باشد.
- در صورت استفاده از ترکیب روش تقویتی NSM و EBR، بار بیشینه به میزان ۱۰۹/۹٪ افزایش یافت. لیکن به هنگام انتخاب سیستم‌های تقویتی، باید با توجه به شرایط مساله، وضعیت دسترسی به منابع و مسایل اقتصادی، بهترین گزینه به عنوان سیستم تقویتی انتخاب گردد.
- روش NSM و EBR باعث افزایش قابل ملاحظه ظرفیت خمشی و نیز افزایش سختی تیر بتنی می‌گردند. روش‌های ذکر شده اثر افزایشی بر شکل‌پذیری سازه ندارند.

## ۵. مراجع

- [1] Hayder Rasheed, Augustine Wuertz, Abdelbaset Traplsi, Hani Melhem, and Tarek Alkhrdaji, "Externally Bonded GFRP and NSM Steel Bars for Improved Strengthening of Rectangular Concrete Beams," *Special Publication*, vol. 298, p. 18, 2014.
- [۲] بابایی. علی، لکی روحانی. محمد، "مقایسه روش‌های نوین مقاوم‌سازی تیرهای بتنی (میلگردهای FRP به روش NSM) با روش‌های قدیمی،" در *ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰*.
- [3] A.Ghani Razaqpur, Marwan Shedid, David Petrina, "Behavior of beams strengthened with novel self-anchored Near Surface Mounted CFRP Bars," *J. Compos. Constr*, vol. 15, pp. 625-634, 2011.
- [4] Tarek Hassan, Sami Rizkalla, "Bond mechanism of NSM FRP bars for flexural strengthening of concrete structures," *ACI Structural Journal*, vol. 101 (6), pp. 830-839, 2004.
- [5] SM Soliman, E El-Salakawy, B Benmokrane, "Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars," *Canadian Journal of Civil Engineering*, no. 37 (10), 2010.
- [6] Dongkeun Lee, Lijuan Cheng, "Assessing the strengthening effect of various Near-Surface-Mounted FRP reinforcements on concrete bridge slab overhangs," *J. Compos. Constr*, Vols. 2011.15:615-624.
- [7] Barros.Joaquim A. O., Dias Salvador J.E, lima Joao L.T, "Efficacy of CFRP-Based Techniques for the flexural and shear Strengthening of Concrete Beams," *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, no. 2007, pp. 203-217.
- [8] Buyukozturk. Oral, Gunes. Oguz, Karaca. Erdem, "Charasterization and Modeling for Debonding in

- RC Beams Strengthened with FRP Composites," in *15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University*, New York, 2002.
- [9] De Lorenzis, L. and Teng, J. G., "Near Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures," *Composites*, vol. Vol. 38, pp. 198-143, 2007.
- [10] Mohamed Ali Sadakathulla, Oehlers, D. J. and Griffith, M. c., "Shear Transfer across Cracks in FRP Strengthened RC Members," *Journal of Composites for Construction*, vol. Vol. 12, pp. 416-424, 2008.
- [۱۱] صادقیان سعید، محسن اعتمادی عیدگاهی، محسن ایزدی نیا "بررسی آزمایشگاهی تقویت برشی تیرهای بتن آرمه توسط ورق‌های CFRP به روش NSM"، در پنجمین کنفرانس ملی سالانه بتن ایران، تهران، ۱۳۹۲.
- [12] Sun, Z.Y., Wu, G., Wu, Z.S., and Luo, Y.B., "Flexural Strengthening of Concrete Beams with Near-Surface Mounted Steel-Fiber-Reinforced Polymer Composite Bars," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vols. Vol. 30, No. 18, 2011, pp. 1529-1537.