

مطالعات عددی بر رفتار خمشی تیر بتن مسلح مقاوم شده با الیاف FRP به روش اتصال خارجی (EBR) و نزدیک به سطح (NSM)

مینو پناهی بروجنی^{1*}، محسن ایزدی نیا²، پرهام معمارزاده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد،

minupanahi@yahoo.com

2- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد،

izadiniam2002@yahoo.com

3- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، p-memar@iaun.ac.ir

⋮

چکیده

یکی از روش‌های تقویت و مقاوم سازی سازه‌ها استفاده از صفحات پلیمری مسلح شده با الیاف FRP می‌باشد. لذا در این پژوهش به بررسی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با FRP می‌پردازیم. یکی از روش‌های معمول چسباندن ورق‌های FRP در سطح خارجی تیرها (EBR) می‌باشد. به دلیل معایب موجود در این روش از جمله جداشدگی زود هنگام ورق‌های FRP روش جدید نزدیک به سطح (NSM) یعنی استفاده از الیاف FRP درون پوشش بتن جایگزین این روش شد. در این مقاله از روش چسباندن خارجی (EBR) و جایگذاری نزدیک سطح (NSM) برای مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه استفاده شده است و میزان کارآمدی این دو روش بر افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی ارزیابی شده است. ابتدا نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از مدل عددی مقایسه شده است. نتایج سازگاری مناسبی با نتایج مدل‌های ساخته شده توسط ABAQUS دارند. سپس تاثیر عرض ورق FRP و ضخامت ورق FRP در روش EBR و فاصله شیارها و اثر فولاد کششی و عمق موثر مقطع در روش NSM بررسی شده است. در انتها به مدل سازی چند نمونه مقاوم شده از ترکیب ورق FRP به روش EBR و آرماتور FRP به روش NSM می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، FRP، روش نزدیک به سطح (NSM)، EBR، ABAQUS

1- مقدمه

امروزه در دنیا بسیاری از سازه‌های زیربنایی که در گذشته ساخته شده‌اند نیاز به ترمیم و تقویت سازه‌ای دارند. یکی از روش‌های جدید ترمیم و تقویت سازه‌ها، استفاده از مواد کامپوزیتی می‌باشد. این مواد کامپوزیتی به صورت پلیمرهای مسلح شده با الیاف می‌باشد. این مواد با استفاده از چسب بر روی اجزای سازه‌ای چسبانده می‌شود. این پلیمرهای مسلح شده با الیاف شامل الیاف با مقاومت بالا می‌باشند که در یک رزین پلیمری بنام زمینه قرار داده شده است. برخی از مزایای پلیمرهای مسلح شده، مقاومت در برابر خوردگی، نارسا بودن، غیرمغناطیسی بودن، نسبت مقاومت بالا به وزن، راحتی نصب و هزینه پایین مراقبت می‌باشد. استفاده از مواد مرکب در ابتدا به دلیل قیمت بالای مواد اولیه و هزینه ساخت، به کندی صورت گرفت، اما مزایای این مواد نسبت به مصالح مرسوم مصرفی در صنعت ساختمان با وجود هزینه‌های بالای ساخت سبب افزایش کاربرد آنها شده است، به

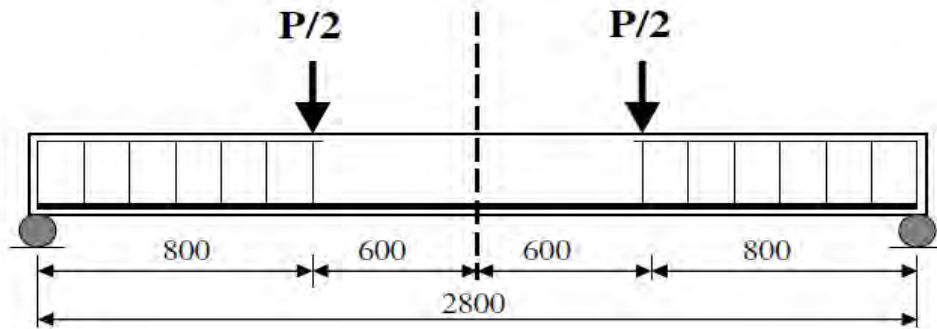
طوری که علاوه بر موارد فوق در تعمیر و تقویت سازه های بنایی نیز از آنها استفاده می شود [1,2]. تا کنون تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است. باروس و فورتس در سال 2005 [3] با هدف افزایش ظرفیت باربری تیرهای بتن آرمه در حالت سرویس و حالت نهایی، با لابریدن میزان تغییر شکل در تیرهای تقویت شده با تسمه های FRP به روش NSM، آزمایشات خمشی بر روی تیرهای بتن آرمه که با مقادیر مختلف تسمه های FRP به سطح مقطع تیر مقاوم شده بودند را انجام دادند. تنگ و همکاران در سال 2006 [4]، آزمایشات خمشی را بر روی تیرهای بتن آرمه که با میله های CFRP به روش NSM مقاوم شده بودند، انجام دادند. بوانگ و همکاران [5] با هدف بررسی رفتار تیر بتن آرمه تقویت شده با میله های GFRP آزمایشاتی را انجام داده اند. ما در این مقاله به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP به کمک روش های عددی می پردازیم. در این پژوهش از دو روش مقاوم سازی اتصال خارجی ورق های FRP (EBR) و اتصال الیاف FRP درون پوشش بتن NSM استفاده می کنیم. هدف ما در این پژوهش مدل سازی به دو روش EBR و NSM و مطالعه پارامتریک و مشاهده نتایج حاصل از ترکیب این دو روش به روش اجزا محدود به کمک نرم افزار ABAQUS می باشد.

2- نمونه های آزمایشگاهی

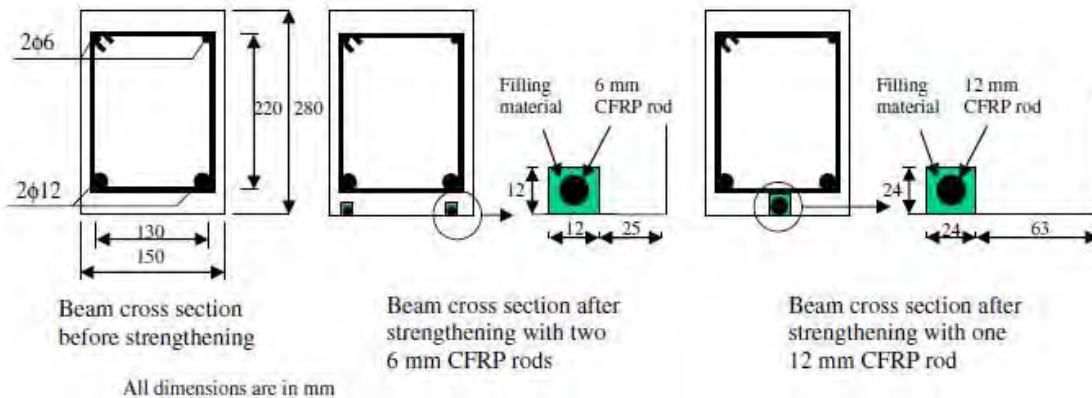
به منظور بررسی صحت نتایج مدل سازی های عددی و قیاس آنها با نتایج آزمایشگاهی لازم بود تا مدل سازی بر روی نمونه های آزمایشگاهی که نتایج آنها منتشر شده، انجام شود. در این پژوهش از تست هایی که توسط فیراس محمود در سال 2009 که مقاوم سازی به روش NSM می باشد [6]، استفاده شده است.

جدول 1: مشخصات نمونه های آزمایشگاهی مقاوم شده [6]

تعداد آرماتور FRP	طول FRP (mm)	مدول الاستیسیته بتن (GPa)	مقاومت کششی بتن (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	تیر
2Φ6	3000	28.4	3.4	37.5	S-C 6 (VC30)
1Φ12	3000	28.4	3.4	37.5	S-C 12 (VC30)
1Φ12	3000	41.3	5.6	66.5	S-C 12 (VC60)
2Φ6	3000	41.3	5.6	66.5	S-C 6 (VC60)
-	-	4.94	29.5	83	چسب اپوکسی



شکل 1: مقطع طولی نمونه‌های مدلسازی شده [6]



شکل 2: مقاطع عرضی نمونه‌های مدلسازی شده [6]

مدل سازی

-3

1-3 المان‌های استفاده شده در مدل سازی

تیرهای بتنی بصورت سه‌بعدی مدل شده‌اند. جهت مش‌بندی تیر از المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای (C3D8R) استفاده شده است. از المان تیر و یا خرپا جهت معرفی آرماتورهای فولادی و آرماتورهای FRP استفاده می‌شود.

در این مقاله از المان خرپا با مش‌بندی سه‌بعدی دو نقطه‌ای T3D2 جهت معرفی آرماتورها استفاده شده است. ورق‌های FRP بصورت سه‌بعدی مدل شده‌اند. جهت مش‌بندی از المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای (C3D8R) استفاده شده است.

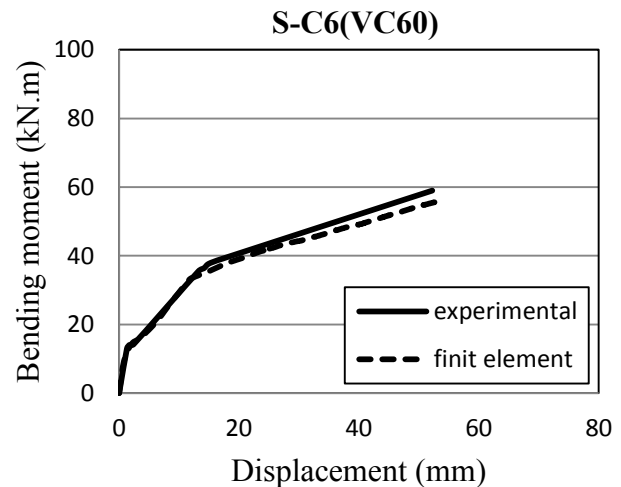
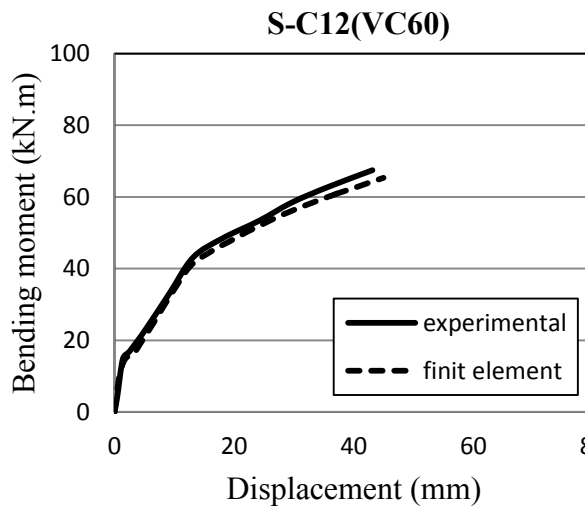
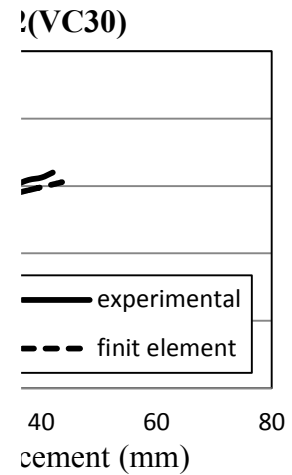
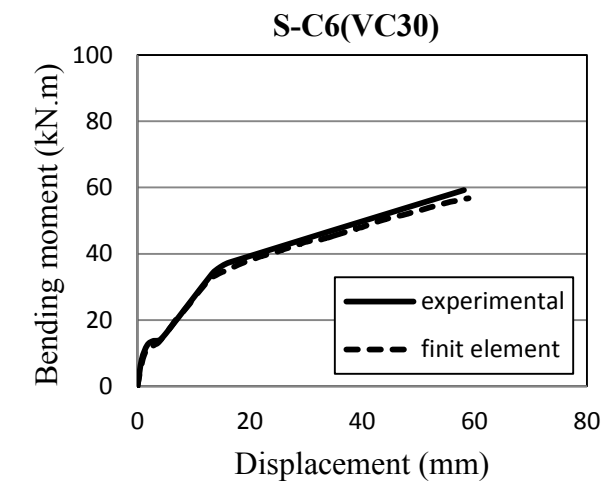
2-3 شبیه سازی رفتار مصالح

شبیه سازی رفتار بتن یکی از گام‌های مهم در مدلسازی می‌باشد زیرا که با تعریف درست مشخصات بتن در این ماژول می‌توان به جواب‌های قابل‌توجهی رسید. تعریف مشخصات بتن در دو مرحله انجام می‌شود، مرحله اول تعریف مشخصات الاستیک بتن و مرحله دوم تعریف مشخصات پلاستیسیته بتن می‌باشد. در مرحله الاستیک مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تعریف می‌شوند. پس از تعیین مشخصات الاستیک بتن باید مشخصات پلاستیسیته را وارد کرد. در این

پژوهش برای تعریف مشخصات پلاستیسیته از مدل رفتاری Concrete Damage Plasticity استفاده شده است [7].

4- پاسخ لنگر خمشی-تغییر مکان نمونه‌ها و صحت سنجی

منحنی لنگر-تغییر مکان تیرها در شکل 3 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل عددی نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است. به منظور درک بهتر از پاسخ لنگر-تغییر مکان وسط دهانه مدل‌های عددی تیرها، جدول 2 ارائه شده است.



شکل 3: نمودارهای لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با میله‌های FRP به روش نزدیک به سطح NSM [6]

جدول 2: نتایج مدل اجزای محدود (شکل 3)

لنگر خمشی نهایی (kN.m)		لنگر تسلیم فولاد (kN.m)		لنگر ترک خوردگی (kN.m)		تیر
عددی	آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	
59	58.5	36	35.2	9	8	S-C6(VC30)
45	44	39	38.2	8	8.1	S-C12(VC30)
62	65.4	48	47.4	7.5	7.8	S-C12(VC60)
74.5	73.2	45.5	44.8	11	11.6	S-C6(VC60)

5- نمونه‌های آنالیز شده در مطالعه پارامتریک

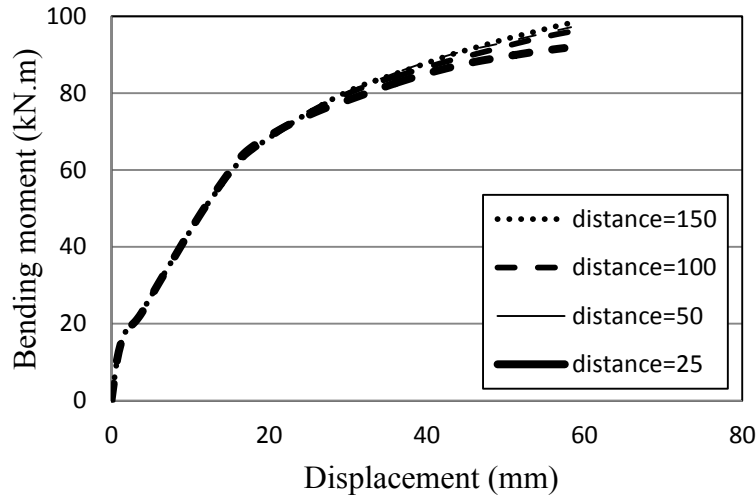
هدف از تحلیل مدل سازی تیرهای مقاوم شده با ورق FRP به روش EBR، مدل سازی تیرهای مقاوم شده با میله‌های FRP به روش NSM، مدل سازی تیرهای مقاوم شده با ترکیب دو روش NSM و EBR، بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله عرض ورق FRP، ضخامت ورق FRP، فاصله شیارها، اثر فولاد کششی، عمق موثر مقطع برخواص رفتاری تیر بتنی مقاوم شده می‌باشد.

6- مدل سازی تیرهای بتن مسلح مقاوم شده با میله‌های FRP به

روش نصب نزدیک سطح (NSM)

6-1 بررسی اثر فاصله شیارها

تیر مورد آزمایش دارای مقطع مستطیلی با عرض 200 mm و ارتفاع 300 mm که شامل 2 آرماتور فولادی با قطر 12 mm در ناحیه کششی و 2 آرماتور با قطر 6 mm در ناحیه فشاری می‌باشد. در این تیر از خاموت‌هایی با قطر 6 mm به عنوان آرماتور برشی که به فاصله 150 mm از هم قرار گرفته اند، استفاده شده است. هدف از ساخت این تیپ نمونه‌ها بررسی اثر فاصله‌ی شیارها و میزان افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده - می‌باشد. پاسخ لنگر خمشی تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌ها با فاصله متفاوت شیارها در شکل 4 و نتایج عددی در جدول 3 مشاهده می‌شود.



شکل 4: نمودار لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با تغییر فاصله شیارها

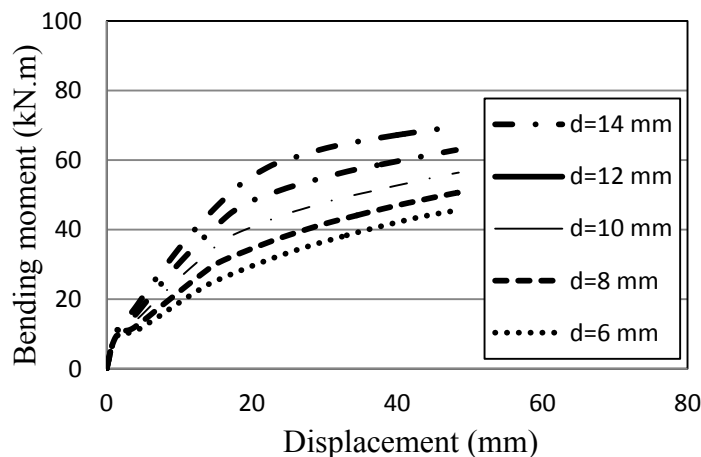
جدول 3: نتایج تیرهای مقاوم شده با فاصله متفاوت شیارها (شکل 4)

فاصله شیارها	لنگر تسلیم فولاد (KN.M)	لنگر خمشی نهایی (KN.M)	خیز نهایی	شاخص شکل پذیری
25	64.72	91.70	57.45	3.37
50	65.31	96.13	58.29	3.42
100	63.74	96.06	58.48	3.44
150	64.12	97.46	58.79	3.45

6-2 بررسی اثر فولاد کششی

در این بخش از تیر S-C12 (VC30) استفاده شده است. تیر مورد آزمایش دارای مقطع مستطیلی با عرض 150 mm و ارتفاع 280 mm که شامل 2 آرماتور فولادی با قطر 12 mm در ناحیه کششی و 2 آرماتور با قطر 6 mm در ناحیه فشاری می‌باشد. در این تیر از خاموت‌هایی با قطر 6 mm به عنوان آرماتور برشی که به فاصله 150 mm از هم قرار گرفته اند، استفاده شده است. هدف از ساخت این تیپ نمونه‌ها بررسی اثر قطر فولادهای کششی و همچنین میزان افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده می‌باشد.

ریشه‌ها با
شکل 5
جدول 4



و نتایج
مشاهده

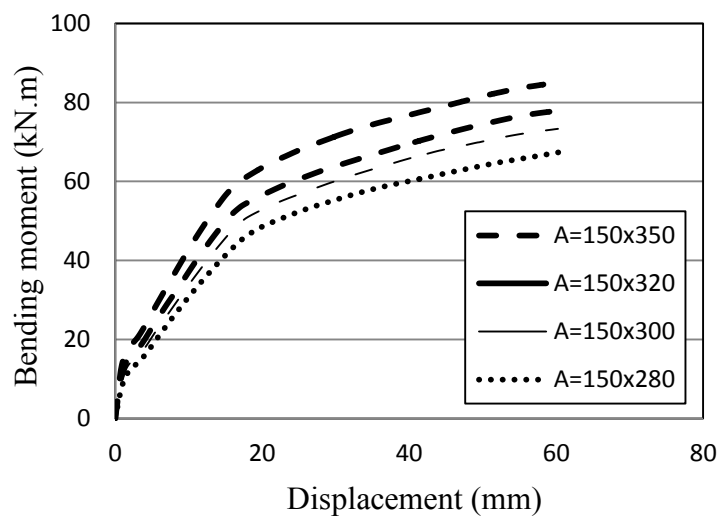
شکل 5: نمودار لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با تغییر قطر فولاد کششی

جدول 4: نتایج تیرهای مقاوم شده با تغییر قطر فولاد کششی (شکل 5)

قطر فولاد کششی mm	لنگر تسلیم فولاد (KN.M)	لنگر خمشی نهایی (KN.M)	خیز نهایی	شاخص شکل پذیری
6	24.29	45.47	48.09	3.20
8	30.04	50.73	48.58	3.03
10	36.82	56.41	48.48	2.85
12	45.77	62.88	48.09	2.67
14	52.29	69.47	47.69	2.51

3-6 بررسی اثر عمق موثر مقطع

در این بخش از تیر S-C12 (VC30) استفاده شده است. تیر مورد آزمایش دارای مقطع مستطیلی با عرض 150 mm و ارتفاع 280 mm که شامل 2 آرماتور فولادی با قطر 12 mm در ناحیه کششی و 2 آرماتور با قطر 6 mm در ناحیه فشاری می‌باشد. در این تیر از خاموت‌هایی با قطر 6 mm به عنوان آرماتور برشی که به فاصله 150 mm از هم قرار گرفته اند، استفاده شده است. هدف از ساخت این تیپ نمونه‌ها بررسی اثر تغییر عمق موثر مقطع تیر و همچنین میزان افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده می‌باشد. پاسخ لنگر خمشی تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌ها با تغییر عمق موثر مقطع در شکل 6 و نتایج عددی در جدول 5 مشاهده می‌شود.



شکل 6: نمودار لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با تغییر عمق موثر مقطع

جدول 5: نتایج تیرهای مقاوم شده با تغییر عمق موثر مقطع (شکل 6)

عمق موثر تیر mm	لنگر تسلیم فولاد (KN.M)	لنگر خمشی نهایی (KN.M)	خیز نهایی	شاخص شکل پذیری
280	47.78	67.43	60.61	3.31
300	50.95	73.32	60.25	3.32
320	53.52	77.69	59.37	3.33
350	58.48	84.54	58.27	3.33

7- مدل سازی تیرهای بتن مسلح مقاوم شده با ورقهای FRP به روش تسلیح خارجی (EBR)

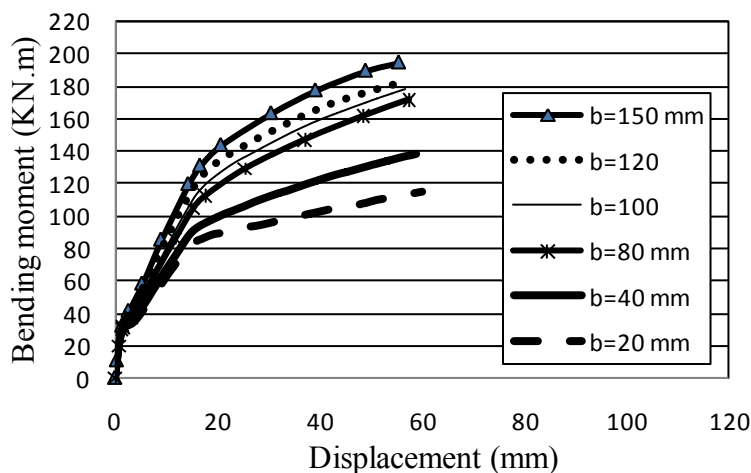
تیر مورد آزمایش دارای مقطع مستطیلی با عرض 200 mm و ارتفاع 300 mm که شامل 2 آرماتور فولادی با قطر 12 mm در ناحیه کششی و 2 آرماتور با قطر 6 mm در ناحیه فشاری می‌باشد. در این تیر از خاموت‌هایی با قطر 6 mm به عنوان آرماتور برشی که به فاصله 150 mm از هم قرار گرفته اند، استفاده شده است. مشخصات نمونه‌ها در جدول‌های زیر ارائه شده است. برای مقاوم سازی این تیرها به وسیله الیاف FRP به جای استفاده از آرماتورهای FRP در روش قبل، از ورق‌های FRP استفاده می‌کنیم. بدین طریق که ورق FRP بر روی وجه کششی تیر چسبانده می‌شود.

1-7 بررسی اثر تغییر عرض ورق FRP

هدف از ساخت این تیپ نمونه‌ها بررسی اثر تغییر عرض ورق FRP و همچنین میزان افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده می‌باشد. پاسخ لنگر خمشی تغییر مکان وسط دهانه برای عرض‌های مختلف ورق‌های FRP در شکل 7 و نتایج عددی در جدول 7 مشاهده می‌شود.

جدول 6: مشخصات ورق‌های FRP

طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
1250	20	1
1250	40	1
1250	80	1
1250	100	1
1250	120	1
1250	150	1



شکل 7: نمودار لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با تغییر عرض ورق های FRP

جدول 7: نتایج تیرهای مقاوم شده با تفاوت عرض از ورق های FRP (شکل 7)

شکل پذیری	خیز نهایی mm	لنگر خمشی نهایی KN.M(لنگر تسلیم فولاد KN.M(عرض ورق FRP mm
4	60	115	81.55	20
3.68	58.97	138.69	90.43	40
3.38	57.49	171.44	107.65	80
3.14	56.68	178.77	114.80	100
2.94	56.04	181.96	124.65	120
2.77	55.42	194.75	139.91	150

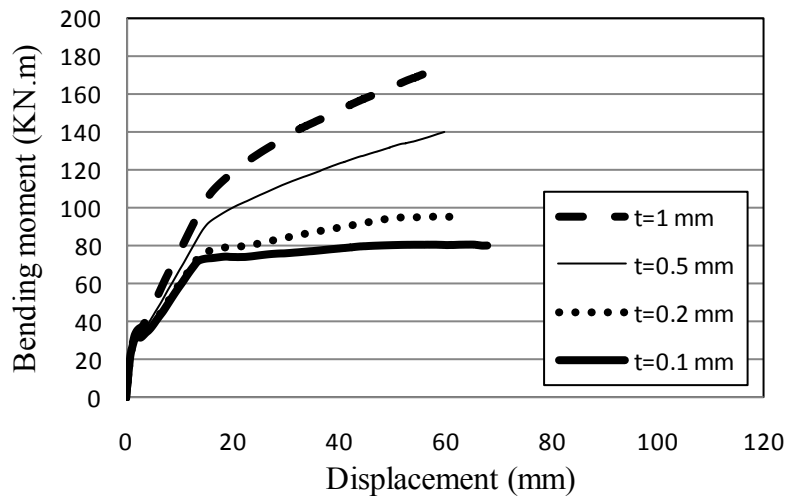
2-7 بررسی اثر تغییر ضخامت ورق FRP

هدف از ساخت این تیپ نمونه ها بررسی اثر تغییر ضخامت ورق FRP و هم-چنین میزان افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده می باشد. پاسخ لنگر خمشی تغییر مکان وسط دهانه برای ضخامت های مختلف ورق های FRP در شکل 8 و نتایج عددی در جدول 9 مشاهده می شود.

جدول 8: مشخصات ورق های FRP

ضخامت ورق mm FRP	طول (mm)	عرض (mm)

80	1250	0.1
80	1250	0.2
80	1250	0.5
80	1250	1



شکل 8: نمودار لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با تغییر ضخامت ورقهای FRP

جدول 9: نتایج تیرهای مقاوم شده با ضخامت متفاوت ورقهای FRP (شکل 8)

شکل پذیری	خیز نهایی mm	لنگر خمشی نهایی KN.M	لنگر تسلیم فولاد KN.M	ضخامت تیر mm
4.86	68.04	79.85	73.00	0.1
4.52	63.32	95.63	75.84	0.2
4.27	59.87	139.65	90.87	0.5
4.10	57.49	171.44	107.65	1

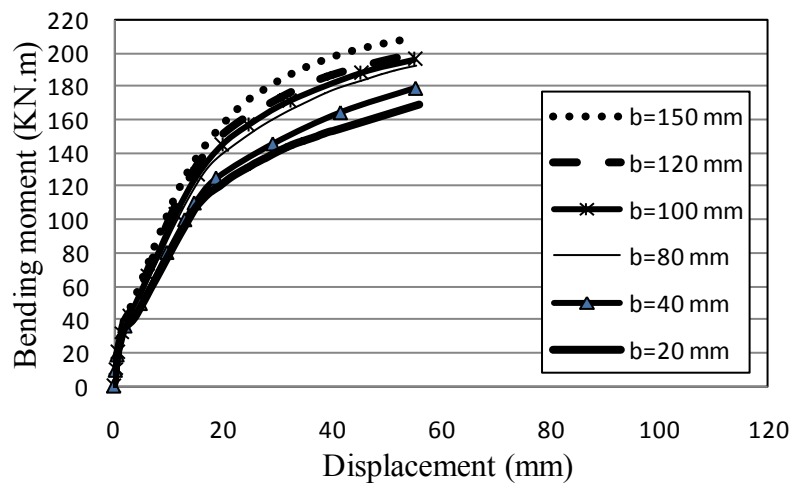
8- مدل سازی تیر بتن مسلح مقاوم شده با ورقها و میله های FRP با ترکیب روش EBR و NSM

تیر مورد آزمایش دارای مقطع مستطیلی با عرض 200 mm و ارتفاع 300 mm که شامل 2 آرماتور فولادی با قطر 12 mm در ناحیه کششی و 2 آرماتور با قطر 6 mm در ناحیه فشاری می باشد. در این تیر از خاموت هایی با قطر

6 mm به عنوان آرماتور برشی که به فاصله 150 mm از هم قرار گرفته اند، استفاده شده است. مشخصات نمونه ها در جدول 10 ارائه شده است. برای مقاوم سازی این تیر به وسیله الیاف FRP، همزمان از ورقهای FRP برای مقاوم سازی به روش EBR و میله های FRP برای مقاوم سازی به روش NSM استفاده می شود. هدف از ساخت این تیپ نمونه ها بررسی میزان تغییر ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده به این روش می باشد. پاسخ لنگر خمشی تغییر مکان وسط دهانه برای این نمونه ها در شکل 9 و نتایج عددی در جدول 11 مشاهده می شود.

جدول 11: مشخصات نمونه ها

طول آرماتور FRP mm	قطر آرماتور FRP mm	تعداد آرماتور FRP	طول ورق FRP (mm)	ضخامت ورق FRP mm
3000	12	1	2500	1



شکل 9: نمودار های لنگر خمشی - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم شده با ترکیب روش NSM و EBR

جدول 11: نتایج حاصل از تیرهای مقاوم شده حاصل از ترکیب دو روش EBR و NSM (شکل 9)

شکل پذیری	خیز نهایی mm	لنگر خمشی نهایی (KN.M)	لنگر تسلیم فولاد (KN.M)	عرض ورق
4.29	55.89	167.96	107.12	b=20 mm
3.94	55.25	178.84	116.38	b=40 mm

3.68	55.24	192.83	131.66	b=80 mm,
3.44	55.19	196.35	139.77	b=100 mm
3.22	54.80	198.96	148.58	b=120 mm
2.73	54.71	208.21	157.48	b=150mm

9- نتیجه گیری

- 1- با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده در خصوص باربری نهایی نمونه‌ها، تأثیر این شیوه‌های مقاوم‌سازی بر بهبود مقاومت تیرهای مقاوم شده قابل‌تشخیص می‌باشد.
- 2- نتایج نشان می‌دهد افزایش فاصله‌ی شیارها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت باربری تیرهای مقاوم شده و شکل پذیری ندارد.
- 3- نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر آرماتور کششی مطابق جدول 4، ظرفیت باربری تیرهای مقاوم شده به ترتیب 11، 24، 37، 53 درصد افزایش می‌یابد و شکل پذیری تیرهای مقاوم شده کاهش می‌یابد.
- 4- نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق موثر مقطع تیر مطابق جدول 5، ظرفیت باربری تیرهای مقاوم شده به ترتیب 8، 14، 25 درصد افزایش می‌یابد. این پارامتر بر شکل پذیری تیرهای مقاوم شده اثری ندارد.
- 5- نتایج نشان می‌دهد با افزایش عرض ورق FRP مطابق جدول 7، ظرفیت باربری تیرهای مقاوم شده به ترتیب 20، 48، 54، 57، 68 درصد افزایش و شکل پذیری تیرهای مقاوم شده کاهش می‌یابد.
- 6- با افزایش ضخامت ورق FRP مطابق جدول 9، باربری تیر به ترتیب به میزان 20، 75، 116 درصد افزایش می‌یابد و شکل پذیری تیر کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این پارامتر از جمله پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر رفتار تیر تقویت شده می‌باشد.
- 7- در روش ترکیبی از ورق‌های FRP و میله‌های FRP، ظرفیت باربری تیرها به ترتیب 6، 15، 17، 19، 24 درصد افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از ترکیب الیاف به دو روش EBR و NSM باعث افزایش ظرفیت باربری در حدود 138، 154، 174، 180، 182، 197 درصد نسبت به تیر بدون ورق FRP گردید و در واقع از ورق‌های FRP برای افزودن سختی به نمونه‌ها استفاده شد و همانگونه که انتظار می‌رفت تغییر شکل نمونه‌ها نسبت به استفاده از میلگرد تنها کاهش و باربری تیر افزایش یافت.



مراجع

[1] اصفهانی، شوشتری، امیرشمالی. تقویت برشی تیرهای بتن مسلح بکمک مواد مرکب. پایان نامه کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مرداد ماه 1358.

[2] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets. *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 129(1): 30-40, (2003).

[3] Barros J. A. O, Fortes A. S. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27(4): 471-480, 2005.

[4] Tang W. C, Balendran R. V, Nadeem A, Leung H. Y. Flexural Strengthening of Reinforced Light Weight Polystyrene Aggregate Concrete Beams with Near Surface Mounted GFRP Bars. *Building and Environment*, 41: 1381-1393, 2006.

[5] Bo Wang G. J, Teng L, De lorenzis L. Strain Monitoring of Rc Strengthened with Smart NSM FRP Bars. *Construction Building Material*, 2006.

[6] Al-Mahmoud F, Castel A, François R, Tourneur C. Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. *Composite Structures*, 91(2): 138-147, 2009.

[7] ABAQUS Inc., ABAQUS/CAE User Manual, Version 6.11.