

تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با CFRP به دو روش چسباندن و نزدیک سطحی

محمد سعید کریمی^۱، مهران ناصری^۲

۱- استادیار و عضو هیات علمی دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه سمنان

civilinfo@gmail.com

چکیده

تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه به دو روش چسباندن ورقهای FRP به سطوح خارجی اعضاء و استفاده از نوارهای FRP به روش NSM (Near Surface-Mounted) می تواند انجام می شود. تقویت خمشی اعضاء بتن آرمه به روش NSM به عنوان یکی از تکنولوژیهای جدید می تواند جایگزین تقویت خمشی تیرها با ورقهای FRP که در سطوح خارجی چسبانده شده اند، شود. نظر به اینکه در تقویت با روش NSM نوارهای FRP از سه جهت در بتن محصور می شوند، لذا پیوستگی و مسائل خرابی رایج در سیستم تقویت با ورقهای FRP که در سطوح خارجی چسبانده شده اند، کاهش یافته و یا حذف می شوند. این مقاله نتایج تحلیل بر روی ۱۵ تیر که با نوارهای CFRP به روش NSM و روش چسباندن ورقهای CFRP تقویت شده اند را به همراه سه تیر تقویت نشده که به عنوان نمونه های کنترلی می باشند ارائه می دهد. محاسبات با استفاده از راهنای طراحی ACI 440-2R-02 و آیین نامه ACI 318-05 انجام و با نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است. نتایج نشاندهنده افزایش مقاومت تسلیم و نهایی نمونه ها و پیش بینی صحیح مدهای شکست خمشی و میزان مقاومت اسمی، اثر انتقال نیرو بین CFRP، چسب و بتن اطراف می باشد.

واژگان کلیدی: مقاوم سازی خمشی، CFRP، تیرهای بتن مسلح، NSM، مهار انتهایی

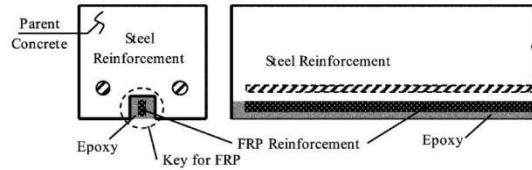
مقدمه:

در حالت سرویس اعضاء خمشی سازه های بتن مسلح ممکن است نیاز به تقویت به علت خوردگی آرماتورها و خرابی بتن، اشتباه در محاسبات و یا ساخت، افزایش بارهای بهره برداری و یا خرابی های پیش بینی نشده سازه داشته باشند. این شرایط مستلزم مقاوم کردن سازه ها برای افزایش مقاومت خمشی آنها می باشد. یکی از روشهای شناخته شده جهت تقویت خمشی تیرها، دیوارها و دالها، چسباندن ورقهای FRP به سطح خارجی آنها می باشد. از خصوصیات مصالح FRP، مقاومت کششی بالا و وزن کم آنها و مقاومت در برابر خوردگی در محیطهای کلریدی می باشد. شکست زود هنگام در اعضاء خمشی تقویت شده با صفحات FRP بکار برده شده در سطوح خارجی تیر (قبل از اینکه مقطع به ظرفیت خمشی نهایی خود برسد) عموماً به علت جدایی پیوستگی میان صفحات FRP و بتن یا پوسته شدن پوشش بتن می تواند رخ دهد. تحقیقات فراوانی در خصوص این رفتار در دسترس می باشد. (Brena et al (2003 [3] جدادشدگی میان صفحات طولی CFRP و بتن را در تغییر شکلهایی کمتر از نصف تغییر شکل ظرفیت نمونه های کنترلی، گزارش داده است. (Nguyen et al (2001 [4] مشاهده نموده است که به علت لایه لایه شدگی و یا پاره شدن زود هنگام پوشش بتن تنها بخش محدودی از صفحات FRP باعث افزایش ظرفیت خمشی تیرها می شوند. (Grace et al (2002 [5] شکست ترد ناشی از کشش برشی و جدادشدگی را برای تیرهای مقاوم شده با صفحات FRP شناسایی کرده است. (Lee و Shin (2003 [6] شکست تیرهای مقاوم شده با صفحات FRP را تحت بارهای ثابت در باری کمتر از ظرفیت خمشی نهایی مقطع گزارش داده اند. علاوه بر مساله شکست ناشی از جدادشدگی صفحات FRP، زخمی شدن FRP، حرارت و خرابی ناشی از محیط از مشکلات دیگر تقویت به روش چسباندن صفحات FRP در سطح خارجی بتن می باشد. لازم به یادآوری است مهار کردن FRP می تواند باعث بهبود استحکام و جلوگیری از پوسته شدن

^۱ - استادیار و عضو هیات علمی دانشگاه سمنان

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سمنان

صفحات FRP چسبانده شده در سطوح خارجی شود. به علت زیانناهی که در روش تقویت ورقهای FRP که در وجه پایین تیر چسبانده شده اند وجود دارد، پیشنهاد می شود که مصالح FRP بجای استفاده در سطوح خارجی محافظت نشده، در محیط داخلی بتن استفاده شود. این تکنولوژی به NSM اشاره می کند (Near-surface-mounted) که در شکل ۱ نشان داده شده است. بتن اطراف از تغییر در خصوصیات مکانیکی FRP و خرابی ناشی از گرما محافظت می کند. از مزایای دیگر استفاده از تکنولوژی NSM، بهبود پیوستگی و انتقال نیرو در بتن اطراف و قابلیت افزایش مقاومت خمشی منفی در پلها و دالها، می باشد.



شکل ۱- عضو بتنی مقاوم شده در خمش با FRP به روش NSM

وقتی از FRP برای افزایش مقاومت خمشی اعضا استفاده می شود، باید به این نکته توجه شود که اعضا باید مقاوم و پایدار در مقابل برش ناشی از افزایش ظرفیت خمشی باشند. جهت پرهیز از شکست برشی، با مقایسه مقاومت برشی طراحی مقطع با مقاومت برشی مورد نیاز، عامل بالقوه شکست برشی این مقطع باید در نظر گرفته شود. اگر مقاومت برشی اضافی لازم باشد، نصب لایه های FRP به طور مایل و متقاطع می تواند مقاومت برشی مقطع را افزایش دهد.

۱- مفاد تحقیق:

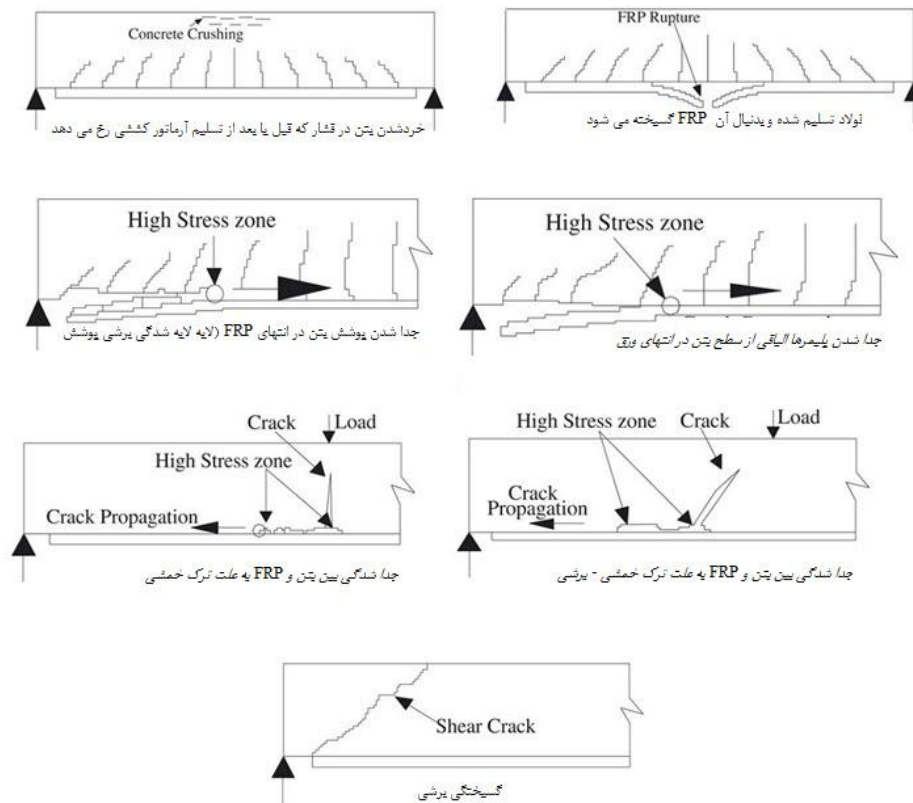
این مقاله رفتار تیرهایی را که به روش NSM با نوارهای CFRP تقویت شده اند را در مقایسه با همان تیرها که با چسباندن ورقهای CFRP به صورت خمشی تقویت شده اند را بررسی می کند. (Nanni (2000 [7] رفتار پانلهای عرشه های پل با تکیه گاه ساده را با لایه های CFRP چسبانده شده به سطوح خارجی و همچنین با میلگردهای CFRP که به روش NSM تقویت شده بودند را بررسی نمود. شکست لایه های CFRP دهانه های عرشه مقاوم شده، شامل ترکیبی از گسیختگی و پوسته شدن لایه های CFRP بوده است. در روشی که دهانه ها به روش NSM با میلگردهای CFRP تقویت شده بودند گسیختگی با شکست کششی میلگردهای CFRP اتفاق افتاده بود در مقایسه با ظرفیت عرشه مقاوم نشده، مقاومت خمشی برای عرشه های مقاوم شده با ورق های CFRP چسبانده شده به سطح خارجی ۱۷ درصد و برای عرشه های مقاوم شده به روش NSM با میلگردهای CFRP ۲۹ درصد افزایش پیدا کرده بود. (2000) Delorenzis [8] سه تیر بتنی مسلح T شکل را که به صورت خمشی به روش NSM با میلگردهای CFRP و GFRP تقویت شده بودند را مورد آزمایش قرار داد. گسیختگی در هر دو نمونه تقویت شده با CFRP به علت جدا شدن و عدم پیوستگی میلگردهای CFRP بوده است. گزارش شده که اثر پیوستگی با استفاده از این تکنولوژی بحرانی تر می باشد. شکست ناشی از عدم پیوستگی در میلگردهای FRP بکار برده شده به روش NSM توسط (2001) Delorenzis و Nanni [9] بیشتر مورد بررسی واقع شد. جدا شدن میلگردهای FRP بکار برده شده به روش NSM به علت شکافتن اپوکسی که جهت نگهداری میلگردها در مکان خود استفاده شده بود، گزارش شده است. این وضعیت شکست ممکن است با افزایش طول پیوستگی و مهار کردن میله های NSM در داخل جان، متوقف شود. در جایی که از عدم پیوستگی FRP جلوگیری شده است، شکافتن و پاره شدن پوشش بتن اطراف میلگردهای فولادی ممکن است وضعیت نهایی را کنترل کند. در مطالعات آزمایشگاهی مربوط به پیوستگی که توسط (2004) Delorenzis et al [10] انجام شده، نشان داده که جهت پرکردن شیارها استفاده از اپوکسی نسبت به خمیر سیمان بهتر است (2001) Taljsten و Carolin [11] چهار تیر بتنی مستطیل شکل را تحت بار یکنواخت چهار نقطه ای بررسی کرده اند که سه تیر از چهار تیر با نوارهای NSM FRP تقویت شده و چهارمین تیر به عنوان نمونه کنترلی بوده است. در دو تا از سه تیر مقاوم شده جهت پیوستگی و چسباندن FRP از اپوکسی و در سومی از دوغاب سیمان استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان داده است که دو تیر از سه تیر مقاوم شده بدلیل نقص در مهار بین نوارهای NSM FRP و بتن گسیخته شده اند. تیر مقاوم شده سوم به علت شکست کششی نوارهای FRP گسیخته شده است. (2004) Rizkalla و EL-Hacha [12] رفتار تیرهای مقاوم شده با سختی محوری یکسان براساس استفاده از میلگردهای NSM FRP و نوارهای NSM FRP و لایه های FRP چسبانده شده به سطوح خارجی را مقایسه کردند. نتایج آزمایش، مقاومت نهایی بزرگتر و افزایش شکل پذیری را در نمونه های مقاوم شده با NSM FRP نشان می دهد. در تیرهای تقویت شده با FRP چسبانده شده به سطوح خارجی، شکست ممکن است به علت برش تیر، فشار خمشی، گسیختگی FRP، جداشدگی چسبندگی FRP یا جداشدگی پوشش بتن رخ دهد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی انجام شده، بیشتر مدهای گسیختگی معمول به علت جداشدگی ورقهای FRP یا جدا شدن و پاره شدن پوشش بتن می باشد. این گسیختگی ها به علت اینکه از تمام قابلیت FRP استفاده نمی شود نامطلوب می باشند، علاوه بر این گسیختگی های زود هنگام عموماً به همراه کاهش شکل پذیری اعضا مقاوم شده می باشند. ضمناً بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی مدهای شکست مختلفی برای تیرهای بتن آرمه که ورقهای FRP در وجه پایین آن چسبانده شده مشاهده شده است. بر اساس مطالعات موجود الگوی مدهای شکست که در آزمایشها مشاهده شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکست تیرهای تقویت شده به روش چساندن FRP در صورت عملکرد کامپوزیت:

- * فولاد تسلیم شده و بدنبال آن بتن خرد می گردد.
- * فولاد تسلیم شده و بدنبال آن FRP گسیخته می شود.
- * خرد شدن بتن (برای مواردی که مقدار تقویت کننده ها نسبتا زیاد می باشد گسیختگی اعضاء بتن آرمه ممکن است ناشی از خرد شدگی فشاری بتن قبل از به تسلیم رسیدن فولاد باشد).

شکست تیرهای تقویت شده به روش چساندن FRP در صورت عدم عملکرد کامل کامپوزیت:

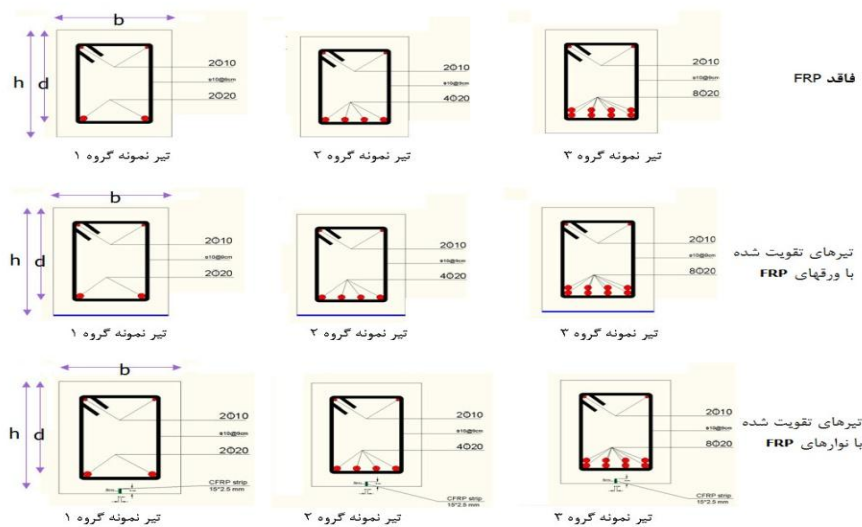
این نوع گسیختگی ها دلالت بر وجود نقص در عملکرد کامپوزیت بین FRP و پوشش بتنی دارد. درابتدا، جدادشدگی موضعی که یک گسیختگی موضعی در ناحیه اتصال بین بتن و تقویت کننده است، محدود به یک سطح کوچک می شود. هنگامی که جدا شدگی موضعی گسترش می یابد، عملکرد کامپوزیت از دست می رود به گونه ای که تقویت کننده FRP دیگر قادر به تحمل بار نبوده و دراین حالت هیچ توزیع تنش در تقویت کننده های FRP ممکن نمی باشد و جدادشدگی بصورت ترد و ناگهانی خواهد بود. این گسیختگی ها شامل جدادشدگی دربتن نزدیک سطح یا راستای الیاف ضعیف شده، جدادشدگی در چسب (گسیختگی خود چسب)، جدادشدگی در سطح بین بتن و چسب ویا بین چسب و FRP می باشد.



شکل ۲. مدهای شکست تیرهای بتن آرمه که بصورت خمشی با ورقهای FRP مقاوم شده اند

۲- مقاومت محاسباتی

این تحلیل شامل ۱۵ نمونه تیر بتنی که با مصالح FRP به دو صورت چساندن و NSM بصورت خمشی تقویت شده اند می باشد. درصد آرماتور تیرها تقریبا به میزان ۲۰، ۴۰ و ۸۰ درصد آرماتور کششی بالانس "ρ_b"، مطابق آیین نامه ACI 318-05 [14] محاسبه شده است. در کلیه نمونه ها از دومیلگرد به قطر ۱۰ میلیمتر جهت تسلیح فشاری، میلگرد به قطر ۲۰ میلیمتر جهت تسلیح کششی و میلگرد ساده به قطر ۱۰ میلیمتر جهت تسلیح عرضی استفاده شده است. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از نمونه ها در شکل ۳ و جدول ۱ ارائه شده است همچنین درجدول شماره ۲ خصوصیات مکانیکی FRP آورده شده است.



شکل شماره ۳- جزئیات تیرهای نمونه

جدول شماره ۱- مشخصات و ابعاد نمونه ها

نام نمونه	h (mm)	b (mm)	d (mm)	میلگردهای کششی	میلگردهای فشاری	میلگرد عرضی	تعداد ورقهای- نوارهای FRP	ابعاد ورقه- نوار FRP (mm)
1-c	400	300	330	2 عدد نمره 20	2 عدد نمره 10	نمره 10 به فاصله 9cm	ندارد	ندارد
1-1FRP-Sheet	400	300	330	2 عدد نمره 20	2 عدد نمره 10	نمره 10 به فاصله 9cm	1	300*0.176
1-2FRP-Sheet	400	300	330				2	300*0.176
1-1FRP-strip	400	300	330				1	15*2.5
1-2FRP-strip	400	300	330				2	15*2.5
2-c	400	300	330				4 عدد نمره 20	2 عدد نمره 10
2-1FRP-Sheet	400	300	330	4 عدد نمره 20	2 عدد نمره 10	نمره 10 به فاصله 9cm	1	300*0.176
2-2FRP-Sheet	400	300	330				2	300*0.176
2-1FRP-strip	400	300	330				1	15*2.5
2-2FRP-strip	400	300	330				2	15*2.5
3-c	400	300	330				8 عدد نمره 20	2 عدد نمره 10
3-1FRP-Sheet	400	300	330	8 عدد نمره 20	2 عدد نمره 10	نمره 10 به فاصله 9cm	1	300*0.176
3-2FRP-Sheet	400	300	330				2	300*0.176
3-1FRP-strip	400	300	330				1	15*2.5
3-2FRP-strip	400	300	330				2	15*2.5

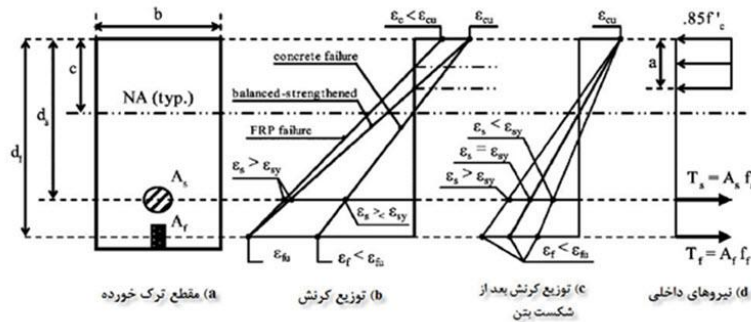
جدول شماره ۲- خصوصیات مکانیکی FRP

مدول الاستیسیته (GP)	مقاومت کششی (Mpa)	کرنش نهایی	ضخامت لایه ها
240	3800	0.0155	0.176

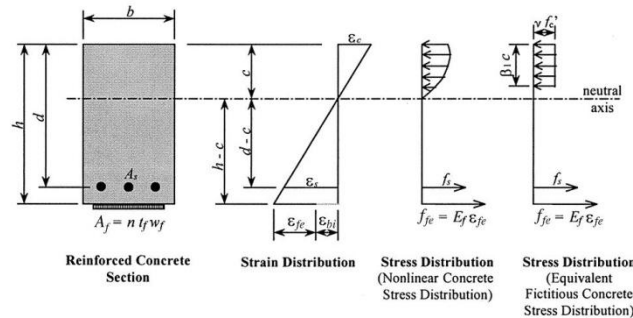
بدلیل اینکه در روش تقویت تیرها با روش NSM نوارهای FRP در محیط محافظت شده قرار دارند و مسائل خرابی رایج ناشی از عدم پیوستگی در آنها کاهش یافته و یا حذف شده است، لذا نیازی به اعمال فاکتورهای کاهش مقاومت در اثر عدم پیوستگی و قرار گرفتن در محیط های خارجی که در ACI 440.2R-02 [13] برای آنالیز تیرهای تقویت شده به روش NSM به آنها اشاره شده، وجود ندارد، لذا رویه زیر جهت بدست آوردن مقاومت نمونه های تقویت شده به روش NSM ارائه شده است:

شکل ۴، شرایط تنش کرنش داخلی، برآیند نیروها برای مقطع ترک خورده در حالت نهایی که درازای درصد آما تور کمتر از آما تور بالاس $p > p_b$ و با FRP تقویت شده است را نشان می دهد. در شکل ۴ به فرضیات زیر اشاره شده است:

تغییرات کرنش در سراسر مقطع خطی است، مقطع در ابتدا ترک نخورده است، پیوستگی کامل بین فولاد و FRP با بتن وجود دارد، کرنش نهایی بتن فشاری برابر 0.003 است، بلوک تنش مستطیلی وبتنی در ناحیه فشاری برای جایگزینی توزیع تنش غیر خطی نهایی قابل قبول است و رفتار تنش - کرنش به صورت الاستو-پلاستیک فرض شده است. همچنین در شکل ۴ به دلیل اینکه مقطع در ابتدا ترک نخورده و $d_f > d_s$ می باشد، کرنش مصالح FRP (ϵ_f) اندکی



شکل ۴- مدل تحلیلی در حد نهایی



شکل ۵- منحنی تنش کرنش ارائه شده در ACI 440.2R

از کرنش فولاد ϵ_s بیشتر شده است، مقاومت خمشی اسمی M_n در تیر ترک نخورده با $\rho_s < \rho_{sb}$ که با FRP تقویت شده است به سطح مقطعی از FRP (A_{fp}) بستگی دارد که در لحظه گسیختگی کششی FRP، بتن فشاری خرد شود. به این سطح مقطع سطح مقطع بالانس FRP گویند. همچنین برای مقطع ترک نخورده $d_f > d_s$ و $\epsilon_f = \epsilon_{fu}$ کرنش فولاد بیشتر از کرنش تسلیم آن $\epsilon_s > \epsilon_{sy}$ می باشد (شکل ۴). با در نظر گرفتن این فرضیات و محدودیت های کرنش و همچنین با در نظر گرفتن معادلات تعادل، سطح مقطع FRP بالانس برابر است با:

$$A_{fb} = 0.85 f'_c * b * \beta_1 * d_f * \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_f} \right) * \frac{1}{f_{fu}} \quad (1)$$

با محدود کردن مقدار FRP براساس رابطه یک، هنگامی که $A_f < A_{fb}$ است شکست با گسیختگی FRP رخ داده و هنگامی که $A_f > A_{fb}$ است، گسیختگی با خرد شدن بتن رخ می دهد. لازم به یادآوری است که A_{fb} می تواند مثبت یا منفی باشد که بستگی به مقدار سطح مقطع فولاد موجود دارد. برای بدست آمدن نتیجه منفی از معادله (1)، A_f همیشه باید از A_{fb} بزرگتر باشد که این بیانگر شکست فشاری بتن می باشد. توزیع کرنش برای شکست بالانس FRP و شکست بتن فشاری در شکل 4(b) نشان داده شده است. چنانچه مقطع با شکست FRP کنترل شود، عمق بلوک فشاری a و مقاومت نهایی M_n ، توسط روابط زیر محاسبه می شود.

$$a = \frac{A_f f_{fu} + A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad \text{for } A_f < A_{fb} \quad (2a)$$

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d_f - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) \quad \text{for } A_f < A_{fb} \quad (2b)$$

همانطور که در شکل 4(b) نشان داده شده، برای مقطعی که با خرد شدن بتن کنترل می‌شود، تنش در فولاد در ابتدا مشخص نمی‌باشد. با ثابت در نظر گرفتن کرنشهای فولاد و بتن به میزان کرنش نهایی ϵ_{cu} ، ϵ_{sy} ، سطح مقطع فولاد جاری شده A_{sy} محاسبه و با مقدار فولاد موجود A_s مقایسه می‌شود. از شکل 5(b) مشخص می‌شود که هنگامی که $A_s < A_{sy}$ است کرنش فولاد برابر f_y است و هنگامی که $A_s > A_{sy}$ است کرنش فولاد براساس سازگاری معادلات بدست می‌آید. با استفاده از این رویه تنش نهایی فولاد برای تمام نمونه‌هایی که با خرد شدن بتن کنترل می‌شوند برابر f_y می‌باشد. با در نظر گرفتن تنش فولاد به مقدار تنش تسلیم آن (f_y)، ارتفاع بلوک فشاری a ، تنش در FRP (F_f) و ظرفیت ممان اسمی مقطع M_n برای نقاطی که با شکست بتن فشاری کنترل می‌شوند براساس روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{sy} = \left[0.85 f'_c b \beta_1 d_s \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}} \right) - A_f E_f \epsilon_{sy} \left(\frac{d_f}{d_s} \right) \right] * \frac{1}{f_y} \quad (3)$$

$$a = \left[\sqrt{(A_f E_f \epsilon_{cu} - A_s f_y)^2 + 4 (0.85) f'_c b \beta_1 A_f E_f \epsilon_{cu} d_f} - (A_f E_f \epsilon_{cu} - A_s f_y) \right] * \frac{1}{2 * 0.85 * f'_c * b} \quad (4a)$$

$$f_f = E_f \epsilon_{cu} \frac{(d_f - \alpha / \beta_1)}{\alpha / \beta_1} \leq f_{fu} \quad (4b)$$

$$M_n = A_f f_f \left(d_f - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) \quad (4c)$$

استفاده از FRP برای افزایش مقاومت خمشی، شکل پذیری عضو را کاهش می‌دهد. در بیشتر موارد این مقدار کاهش در شکل پذیری قابل صرف نظر کردن است. برای حفظ شکل پذیری کافی، باید مقدار کرنش در فولاد در حالت حد نهایی کنترل شود. بر این اساس شکل پذیری مناسب هنگامی به دست می‌آید که کرنش فولاد در نقطه خرد شدن بتن یا گسیختگی FRP (شامل جدا شدن پوشش بتنی یا چسبندگی)، دست کم 0.005 باشد. مفهوم مطرح شده این گونه است که برای جبران شکل پذیری مقطع، از مقاوم تر کردن آن می‌توان استفاده کرد. رسیدن به مقاومت بیشتر با اعمال ضریب کاهش مقاومت 0.7 برای مقاطع ترد، برخلاف ضریب 0.9 برای مقاطع شکل پذیر، تأمین می‌شود. برای این منظور، مقدار ضریب کاهش را می‌توان در حالت های مختلف بر حسب کرنش فولاد، ϵ_s در حالت حد نهایی از رابطه (5) به دست آورد.

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \epsilon_s \geq 0.005 \\ 0.7 + \frac{0.2(\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0.005 - \epsilon_{sy}} & \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0.005 \\ 0.7 & \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \end{cases} \quad (5)$$

این رابطه، ضریب کاهش را برای مواد شکل پذیر 0.9 و مواد ترد 0.7 (که در آن فولاد جاری نمی‌شود) دسته بندی کرده و یک رابطه خطی بین این دو حد برای ضریب کاهش فراهم کرده است. همچنین برای اجتناب از تغییر شکل غیرالاستیک اعضای بتن آرمه تقویت شده با FRP، فولادهای داخلی موجود نباید تحت بارهای سرویس، به حالت تسلیم برسند. تنش در فولاد تحت بار سرویس باید به $0.80 f_y$ (محدود شود). جهت بدست آوردن مقاومت نمونه های تقویت شده که FRP در سطوح خارجی آنها چسبانده شده از دستور العمل ارائه شده در راهنمای طراحی ACI 440.2R [13] استفاده است. خلاصه نتایج تحلیل دو روش فوق در جدول 3 خلاصه شده است.

در روابط فوق A_s, A_f : سطح مقطع FRP و فولاد - A_{fb} : سطح مقطع بالانس FRP - A_{sy} : سطح مقطع فولادی که همزمان با خرد شدن بتن جاری می‌شود - a : ارتفاع بلوک فشاری بتن - b, c : ارتفاع تار خنثی و عرض مقطع - d_f, d_s : ارتفاع مرکز میلگردها و FRP از تار بالایی مقطع - E_f, f'_c : مقاومت بتن و مدول الاستیسیته FRP - f_f, f_y : تنش در FRP و فولاد - F_f, F_{fu} : مقاومت نهایی FRP و فولاد - M_n : ممان اسمی مقطع - β_1 : نسبت a/c - T_f, T_s : نیروی کششی در فولاد و FRP - $\epsilon_s, \epsilon_{sy}$: کرنش در فولاد و FRP - $\epsilon_{cu}, \epsilon_{fu}$: کرنش نهایی FRP و فولاد. f_s, s : تنش فولاد تحت بار سرویس می‌باشد.

جدول ۳ - خلاصه نتایج تحلیل تیرهای تقویت شده با FRP به دو روش NSM و چسباندن

نام نمونه	ρ_s	ρ_{sb}	ρ_s/ρ_{sb}	A_f (mm ²)	A_{fb} (mm ²)	A_f/A_{fb}	کرنش فولاد	کرنش موثر FRP	کرنش نهایی FRP	نوع گسختگی	Mn (Kn.m)	phi	phi*Mn (Kn.m)
1-c	0.005	0.025	0.206	N/A	N/A	N/A	0.0173	N/A	N/A	SY	71.43	0.9	64.29
1-1FRP-sheet				52.8	23.58	2.24	0.00931	0.01185	cc	112.78	0.9	101.50	
1-2FRP-sheet				105.6	23.58	4.48	0.00764	0.0099	cc	151	0.9	135.90	
1-1FRP-Strip				37.5	21.34	1.76	0.01114	0.01373	cc	106.28	0.9	95.65	
1-2FRP-Strip				75	21.34	3.51	0.00878	0.01094	cc	124.77	0.9	112.29	
2-c	0.01	0.025	0.411	N/A	N/A	N/A	0.007	N/A	N/A	SY	142.13	0.9	127.92
2-1FRP-sheet				52.8	-47.32	-1.12	0.00576	0.00761	cc	175.81	0.9	158.23	
2-2FRP-sheet				105.6	-47.32	-2.23	0.00652	0.00652	cc	192.84	0.9	173.56	
2-1FRP-Strip				37.5	-49.56	-0.76	0.00616	0.00784	cc	171.25	0.9	154.13	
2-2FRP-Strip				75	-49.56	-1.51	0.00538	0.00692	cc	166.24	0.9	149.62	
3-c	0.021	0.025	0.826	N/A	N/A	N/A	0.0019	N/A	N/A	cc	238.27	0.7	154.88
3-1FRP-sheet				52.8	-189.13	-0.28	0.00192	0.00315	cc	251.32	0.7	175.92	
3-2FRP-sheet				105.6	-189.13	-0.56	0.00187	0.00309	cc	254.32	0.7	178.02	
3-1FRP-Strip				37.5	-191.37	-0.20	0.00194	0.00303	cc	251.54	0.7	176.08	
3-2FRP-Strip				75	-191.37	-0.39	0.00192	0.003	cc	255.14	0.7	178.60	

* CC = شکست فشاری بتن

*SY = چاری شدن فولاد

۳- مهار سیستم FRP

اگرچه استفاده از FRP در مقاوم سازی با موفقیت های زیادی رو به روشده است، اما نگرانی ها در رابطه با مهار و لایه لایه شدن برای انواع کاربردها هنوز باقی مانده است زیرا این تکنولوژی به کیفیت تنش منتقل شده در سطح بتن و یا عمق پوشش بتن، وابسته است. برای جلوگیری و یا به تاخیر انداختن پوسته شدن لایه ها، مهار FRP الزامی است. هنگامی که طول لایه محدود باشد، مهار انتهایی بحرانی است و طول پیوستگی فراهم شده برای رسیدن به ظرفیت طراحی لایه FRP کافی نمی باشد. یک سیستم مهار ایده آل برای لایه های FRP باید با مقاومت مصالح خودش و ویژگیهای پایایی سازگار باشد و از هر تمرکز تنشی دوری کند. به طور مثال صفحات فولادی پیچ شده در انتهای لایه ها، برای افزایش ظرفیت برشی قطعات بتن آرمه پیشنهاد می شوند. اگر چه استفاده از این مهارهای فولادی معمولاً به علت امکان خوردگی، ناسازگاری الکتریکی با FRP و تمرکز تنش غیر عملی است.

در سیستم تقویت به روش NSM نیروی منتقل شده بین CFRP و دوجاب اپوکسی اطراف قادر است تا مقاومت کششی نوارهای CFRP را به ظرفیت نهایی خود برساند و ضخامت نوارهای مستطیل شکل CFRP و سطح زیر آنها در انتقال نیرو بین اپوکسی و بتن موثر می باشد [1]. هنگامی که از لایه های FRP خارجی جهت مقاوم سازی اجزاء بتنی استفاده می شود، یک سیستم مهاری می تواند از پوسته شدن زودهنگام FRP پیش گیری کند. طراحی خمشی در راهنمای طراحی ACI 440.2R، فاکتور K_m که کرنش FRP را کاهش می دهد، برای محاسبه پدیده پوسته شدن تعریف می کند. اساس توسعه فاکتور K_m تجربی است. معادله ای که برای بدست آوردن K_m استفاده می شود بصورت زیر است:

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} * \left(1 - \frac{n * E_f * t_f}{360000}\right) \leq 0.90 & \text{for } (n * E_f * t_f) \leq 180000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} * \left(1 - \frac{90000}{n * E_f * t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } (n * E_f * t_f) > 180000 \end{cases} \quad (6)$$

که ε_{fu} کرنش نهایی در لایه FRP است و n تعداد لایه های FRP، E_f مدول الاستیسیته کششی FRP برحسب MPa و T_f ضخامت لایه FRP به میلی متر است. برای محاسبه کرنش لایه ها راهنمای طراحی پیشنهاد می کند که در معادله بالا فاکتور K_m بزرگتر از 0.9 نباشد. تحقیق آزمایشگاهی انجام شده توسط Nagaraj Eshwar, Antonio Nanni, and Timothy James Ibell (2008) [15] نشان می دهد که عملکرد CFRP که به سطح خارجی چسبانیده شده اند وقتی که مهار انتهایی به کار رود، ۷ تا ۵۱٪ افزایش پیدا می کند. لذا جهت بهره گیری از عملکرد کامل سیستم تقویت خمشی با CFRP اعمال سیستم مهار بندی در انتهای لایه، اعمال سیستم پیش تنیدگی در لایه CFRP، استفاده از کامپوزیت های هیبریدی پیشنهاد شده است. [16]

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر ورقها و نوارهای FRP در تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح بررسی گردید. مقاومت خمشی ۱۵ تیر با سه درصد مختلف آرماتور که به روش چسباندن FRP به سطوح خارجی و روش نزدیک سطحی (NSM) تقویت شده اند محاسبه گردید. براساس اطلاعات بدست آمده از محاسبات و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر بدست آمده است:

- ۱- شبیه به مطالعات قبلی، نمونه های تقویت شده از مقاومت و سختی بیشتری نسبت به نمونه های کنترلی برخوردار بودند.
- ۲- با افزایش در صد آرماتورها، مقاومت اسمی نمونه های تقویت شده به میزان کمی نسبت به نمونه های تقویت نشده افزایش یافته است. افزایش مقاومت برای تیرهای گروه ۱ به میزان ۵۰ تا ۱۰۰ درصد، گروه ۲ به میزان ۱۶ تا ۳۵ درصد و برای تیرهای گروه ۳ به میزان ۱۳ تا ۱۵ درصد می باشد.
- ۳- افزایش مقاومت با اضافه کردن ورقهای CFRP از یک لایه به دو لایه نسبت به نمونه های مشابه که از نوارهای CFRP استفاده شده است، در نمونه های گروه یک و دو، دو برابر می باشد.
- ۴- در تیرها با درصد آرماتور بالا مقاومت تیر های تقویت شده با ورقهای CFRP تقریباً برابر با تیرهای تقویت شده با نوارهای CFRP می باشد.
- ۵- در تمام نمونه ها، تیرهای تقویت شده با ورقهای CFRP چسبانده شده به سطح خارجی دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه های مشابه خود که به روش NSM تقویت شده بودند داشتند.
- ۶- جهت بالابردن ظرفیت باربری مقطع و جلوگیری از گسیختگی های زودرس استفاده از یک سیستم مهار بندی مناسب الزامی است.

مراجع

- 1- Yost Joseph Robert, Shawn P. Gross, David W. Dinehart, and Jason J. Mildenberg, 2007 , Flexural Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Strips. *ACI Structural Journal/July-August 2007* .
- 2- Esfahani, Kianoushb, 2006 , Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets.
- 3- Brena, S. F, Bramblett, R. M.; Wood, S. L. and Kreger, M. E., 2003, "Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites," *ACI Structural Journal, V. 100, No. 1, Jan.-Feb., pp. 36-46.*
- 4- Nguyen, D, Chan, T.; and Cheong, H., 2001, "Brittle Failure and Bond Development Length of CFRP-Concrete Beams," *Journal of Composites for Construction, ASCE, V. 5, No. 1, pp. 12-17.*
- 5- Grace, N, Abdel-Sayed, G.; and Ragheb, W., 2002, "Strengthening of Concrete Beams Using Innovative Ductile Fiber-Reinforced Polymer Fabric," *ACI Structural Journal, V. 99, No. 5, Sept.-Oct., pp. 692-700.*
- 6- Shin, Y. S, and Lee, C., 2003, "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates at Different Levels of Sustaining Load," *ACI Structural Journal, V. 100, No. 2, Mar.-Apr., pp. 231-239.*
- 7- Nanni, A., 2000, "FRP Reinforcement for Bridge Structures," *Proceedings, Structural Engineering Conference, University of Kansas, Lawrence, Kans., Mar. 16, pp. 1-5.*
- 8- DeLorenzis, L. A.; Nanni, A.; and Tegila, A. L., 2000, "Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Bars," *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, Aug. 15-18, pp. 521-528.*
- 9- DeLorenzis, L., and Nanni, A., 2001, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods," *ACI Structural Journal, V. 98, No. 1, Jan.-Feb., pp. 60-68.*
- 10- DeLorenzis, 2004, "Anchorage Length of Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Concrete Strengthening—Experimental Investigation and Numerical Modeling," *ACI Structural Journal, V. 101, No. 2, Mar.-Apr., pp. 269-278.*
- 11- Taljsten, B, and Carolin, A, 2001, "Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Laminates," *Proceedings of the Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, FRP RCS-5 Conference, July 16-18, Cambridge, UK, pp. 107-116.*
- 12- El-Hacha, R, and Rizkalla, S, 2004, "Near-Surface-Mounted Fiber- Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures," *ACI Structural Journal, V. 101, V. 5, Sept.-Oct., pp. 717-726.*
- 13- ACI Committee 440.2R-02. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. 2002.
- 14- ACI 318-05. Building code requirements for structural concrete (318M-05) and commentary (318RM-05). Farmington Hills (Michigan, USA): American Concrete Institute (ACI); 2005.
- 15- Nagaraj Eshwar, Antonio Nanni, and Timothy James Ibell, 2008 ,Performance of Two Anchor Systems of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Laminates, *ACI Materials Journal/January-February 2008.*
- ۱۶- دکتر محمود میری، دکتر حسین علی بیگی، امیر قدس، بررسی معایب تقویت تیرهای بتن آرمه با کامپوزیت های FRP و راهکارهای پیشنهادی.