

مطالعه آزمایشگاهی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح پیش‌تنیده و مقاوم شده با CFRP

ابوالفضل عربزاده^{۱*}، اصغر امانی داشلجه^۲، ایرج محمودزاده کنی^۳

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استاد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

arabzade@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۷/۲۲]

چکیده- در سال‌های اخیر برای افزایش ظرفیت برشی تیرهای عمیق از روش پیش‌تنیدگی و یا تقویت با CFRP استفاده شده است و اثر هم‌زمان پیش‌تنیدگی و مقاوم‌سازی تیر عمیق مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی رفتار تیرهای عمیق دو سر ساده در حالات مختلف تیرهای عمیق معمولی، تیرهای عمیق پیش‌تنیده و تیرهای عمیق مقاوم‌شده با CFRP پرداخته شده و رفتار آن‌ها با هم مقایسه شده است. در این راستا ۱۰ تیر عمیق با نسبت دهانه به ارتفاع ۲ ساخته شده و تا نقطه خرابی تحت بار تک‌نقطه‌ای قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اگر تیرهای عمیق معمولی و پیش‌تنیده با ظرفیت برشی یکسان، با آرایش مناسبی از CFRP تقویت شوند، تیر عمیق پیش‌تنیده تقویت شده شکل‌پذیری بیشتری داشته و مقاومت نهایی آن حدود ۷٪ بیشتر از تیر عمیق معمولی تقویت شده خواهد بود. همچنین رابطه‌ای برای تعیین بار نهایی برشی تیرهای عمیق معمولی و پیش‌تنیده پیشنهاد شده است که در مقایسه با سایر روش‌های موجود از هم‌خوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است.

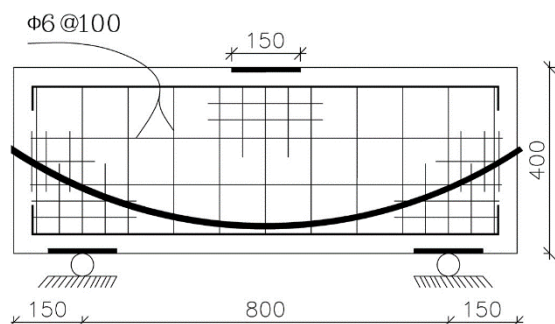
واژگان کلیدی: تیر عمیق، بتن مسلح، پیش‌تنیده، الیاف پلیمری کربنی (CFRP).

۱- مقدمه

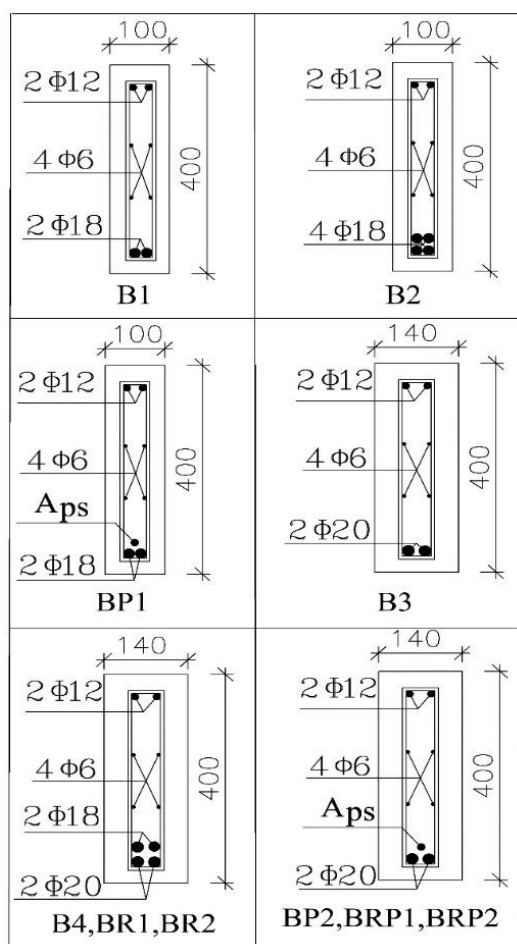
از دهه ۶۰ میلادی با جدی شدن مطالعات بر روی تیرهای عمیق، بحث استفاده از پیش‌تنیدگی نیز در آن‌ها مطرح شد که اولین مطالعات مربوط به کار سارگیوس و تادروس [۱] در سال ۱۹۷۴ است. سارگیوس به همراه دیلگر [۲] در سال ۱۹۷۷ مطالعه دیگری نیز انجام داده است. اصلی‌ترین مطالعات تیرهای عمیق پیش‌تنیده با پژوهش الشقیر و رامیرز [۳] در سال ۱۹۹۲ شروع شده و با مطالعات نظری و آزمایشگاهی صورت گرفته به وسیله پژوهشگران مختلف [۴ تا ۶] ادامه یافته است. در این مطالعات، چند رابطه برای محاسبه مقاومت برشی

تیرهای عمیق بتن مسلح، اعضای سازه‌ای است که به دلیل داشتن هندسه و بارگذاری خاص، رفتاری متفاوت از تیرهای معمولی دارند. به علت ضخامت کم در مقایسه با ارتفاع در این تیرها، معمولاً تراکم آرماتورهای خمشی زیاد بوده و لازم است که در چند لایه قرار داده شوند. یکی از راه‌های موثر برای کاهش تراکم آرماتورهای خمشی استفاده از آرماتورهای پیش‌تنیده به جای آرماتورهای معمولی است که در این صورت بحث تیر عمیق پیش‌تنیده مطرح خواهد شد.

این تیرها نیز ارائه شده است. در سال‌های اخیر بحث مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح با الیاف FRP نیز مورد توجه قرار گرفته و هم‌زمان با آن، چنین مطالعاتی در مورد تیرهای عمیق انجام شده است. یکی از اولین پژوهش‌ها در این زمینه، مطالعه صورت گرفته به وسیله شلال و همکاران [۷] است که این پژوهش‌ها نیز با پژوهش‌های انجام گرفته به وسیله پژوهشگران مختلف [۸ تا ۱۰] ادامه یافته است. در تمامی مطالعات انجام شده در زمینه مقاوم‌سازی تیرهای عمیق با FRP^۱، تیرهای غیرپیش‌تنیده با و بدون بازشو مورد بررسی قرار گرفته است و نمونه‌ای از مطالعه رفتار تیر عمیق پیش‌تنیده مقاوم‌شده با FRP وجود ندارد. این در حالی است که یکی از اصلی‌ترین موارد مقاوم‌سازی با FRP، استفاده از آن در پل‌های بتن مسلح است که در بیشتر مواقع شاه‌تیر آن پیش‌تنیده بوده و در برخی مواقع به صورت تیر عمیق است. بنابراین، در این گونه موارد بحث مقاوم‌سازی تیر عمیق پیش‌تنیده مطرح است. در این مقاله به این موضوع پرداخته شده و آثار استفاده از پیش‌تیدگی و FRP در افزایش مقاومت برشی تیرهای عمیق بررسی شده است. به همین منظور ۱۰ تیر عمیق پیش‌تنیده و غیرپیش‌تنیده در آزمایشگاه سازه دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل (۱) جزییات آرماتوربندی نمونه‌های ساخته شده



شکل (۲) مقاطع تیرهای عمیق ساخته شده

۲- کار آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

نسبت دهانه به ارتفاع تیرهای آزمایش شده ۲ است. انتخاب این نسبت به دلیل هم‌خوانی با تمامی آیین‌نامه‌های موجود است. سایر مشخصات تیرها در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. تمامی ابعاد نشان داده شده بر روی این شکل‌ها بر حسب mm است. از ۱۰ تیر مورد بررسی، ۴ تیر عمیق معمولی، ۲ تیر پیش‌تنیده، ۲ تیر مقاوم شده با CFRP و ۲ تیر نیز به طور هم‌زمان هم پیش‌تنیده شده و هم با CFRP مقاوم شده‌اند. در نمونه‌های پیش‌تنیده در دو انتهای تیر آرماتورگذاری اضافی صورت گرفته تا از وقوع خرابی ناشی از نیروی شکافنده حاصل از پیش‌تیدگی جلوگیری شود. چگونگی نامگذاری

جدول (۳) ویژگی فولاد پیش‌تندگی

۰/۹۸۷	سطح مقطع فولاد در کابل (cm^2)
۱۹۶۵۰۰۰	مدول ارتجاعی ($\frac{kg}{cm^2}$)
۱۸۳۷۰	کمینه مقاومت نهایی (kg)
۶۰ cm	کمینه افزایش طول ۳/۵٪ برای طول

ورق الیافی با الیاف یک جهته نیز از جنس کربن (CFRP) بوده و ویژگی مانند جدول شماره (۴) دارد.

جدول (۴) مشخصات الیاف CFRP

۰/۰۱۱۱	ضخامت (cm)
۰/۲	وزن ($\frac{kg}{m^2}$)
۴۹۰۰۰	مقاومت کششی الیاف ($\frac{kg}{cm^2}$)
۲۳۰۰۰۰۰	مدول ارتجاعی ($\frac{kg}{cm^2}$)
۰/۰۰۱۸	وزن مخصوص ($\frac{kg}{cm^3}$)

۳-۲- انجام آزمایش‌ها

بار به صورت تک‌نقطه‌ای در وسط تیر و به وسیله‌ی جک Ton ۱۰۰ و به صورت استاتیکی و با سرعت بارگذاری ۰/۳ $\frac{ton}{sec}$ به نمونه‌ها اعمال شده است. از چهار سنسور تغییر مکان‌سنج (LVDT) در تمامی آزمایش‌ها استفاده شده است. به منظور مشاهده بهتر مسیر گسترش ترک و راستای آن، روی تیرها در چشمه‌های ۱۰ cm خط‌کشی شده‌اند. در جدول (۵) نتایج حاصل از آزمایش تیرها و در شکل (۳) چگونگی خرابی آن‌ها نشان داده شده است.

۳- مشاهده‌ی آزمایشگاهی

۳-۱- تیرها با ضخامت ۱۰ cm

این نمونه‌ها شامل دو تیر عمیق معمولی B1 و B2 و تیر پیش-

پیش‌تندگی نمونه‌ها از نوع پس‌کشیده نچسبیده است که از یک طرف تا اندازه $\sqrt{F_{pu}} / ۲$ کشیده شده‌اند که F_{pu} مقاومت نهایی کابل پیش‌تندگی است.

۲-۲- مشخصات مصالح

نظر به پیش‌تندگی بودن تعدادی از نمونه‌ها و لزوم استفاده از بتن با مقاومت بالای $\frac{kg}{cm^2}$ ۳۰۰، در این پژوهش بتنی با مقاومت است و آن‌ها بالای $\frac{kg}{cm^2}$ ۴۰۰ در نظر گرفته شده و طرح اختلاطی مانند آنچه که در جدول (۱) نشان داده شده به کار رفته است.

آرماتور پیش‌تندگی مورد استفاده، کابل ۷ رشته‌ای غلاف‌دار گلوبال با گرید ۲۷۰ و قطر اسمی ۱/۲۷ cm (۰/۵ اینچ) و بر اساس استاندارد ASTM A 416/A 416M است. مشخصات آرماتورهای معمولی و پیش‌تندگی به ترتیب در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول (۱) مصالح مورد استفاده در مخلوط بتن

مقدار استفاده شده برای m^3	مصالح
۲۱۰	آب (kg)
۵۲۵	سیمان (kg)
۹۳۵	شن (kg)
۶۷۳/۲	ماسه (kg)
۴/۴	فوق روان‌کننده NSF (lit)

جدول (۲) مقاومت تسلیم آرماتورهای معمولی

مقاومت تسلیم ($\frac{kg}{cm^2}$)	قطر آرماتور (mm)
۴۱۰۰	۲۰
۲۷۴۰	۱۸
۳۴۸۰	۱۲
۸۸۶	۶

تنیده BP1 است. در تیر B2 با دو آرماتور کششی بیشتر نسبت به B1 مقاومت نهایی به اندازه ۱۰٪ اضافه شده و افت وسط دهانه ۳۶٪ کاهش یافته است.

در تیر BP1 به جای افزایش دو آرماتور نمره ۱۸، یک کابل نیم اینچی به مقطع تیر B1 اضافه شده است. با انجام این کار بار نهایی تیر به اندازه ۷٪ افزایش یافته است.

مقاومت بتن نقش مهمی در مقاومت برشی تیرهای عمیق دارد. هر دو تیر B2 و BP1 به ترتیب به اندازه ۱۴٪ و ۵٪ دارای مقاومت بتن بیشتری نسبت به B1 است. در حالی که بار نهایی تیرهای B2 و BP1 به ترتیب ۱۰٪ و ۷٪ بیشتر از B1 است. در صورتی که مقاومت بتن نمونه‌ها یکسان بود، انتظار می‌رفت که BP1 دارای بار نهایی بیشتری نسبت به B2 باشد. بنابراین پیش-تنیده کردن تیر توانسته تاثیرگذار باشد و اثری شبیه دو آرماتور کششی نمره ۱۸ داشته باشد و با جایگزینی کابل‌های پیش‌تنیده به جای آرماتورهای معمولی علاوه بر کاهش تراکم آرماتورها می‌توان در کنار افزایش مقاومت خمشی، مقاومت برشی تیر را

نیز افزایش داد.

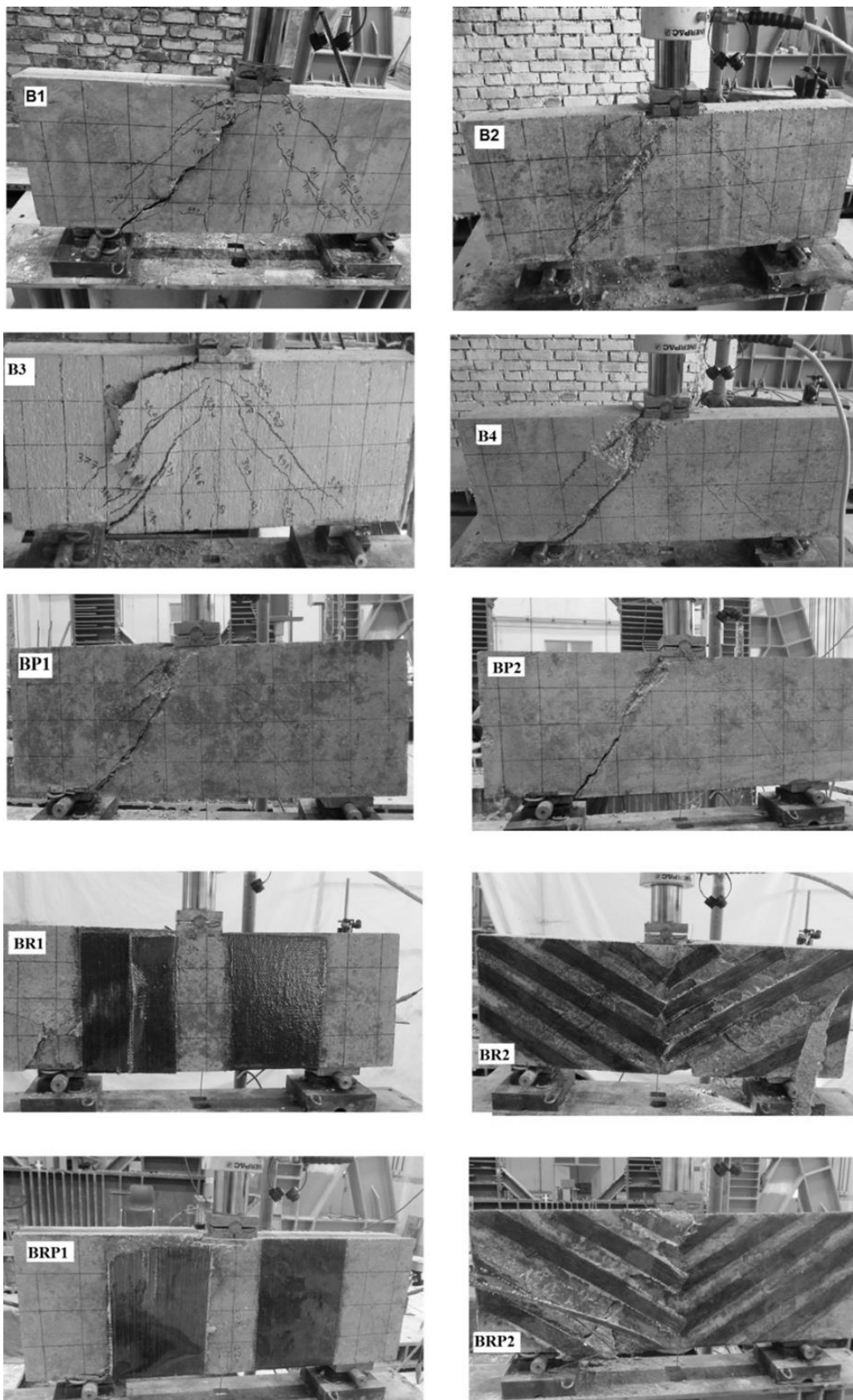
در شکل (۴) منحنی بار-افت وسط دهانه تیرها نشان داده شده است. با دقت در شکل (۴a) مشاهده می‌شود که پیش‌تنیده کردن تیر، علاوه بر افزایش مقاومت، باعث افزایش سختی اولیه تیر و در نتیجه افزایش ظرفیت جذب انرژی تیر نیز می‌شود. یکی از مهم‌ترین عوامل در تفاوت سختی نمونه‌ها، تفاوت مقاومت فشاری بتن آن‌هاست.

۳-۳- تیرهای عمیق با ضخامت ۱۴ cm

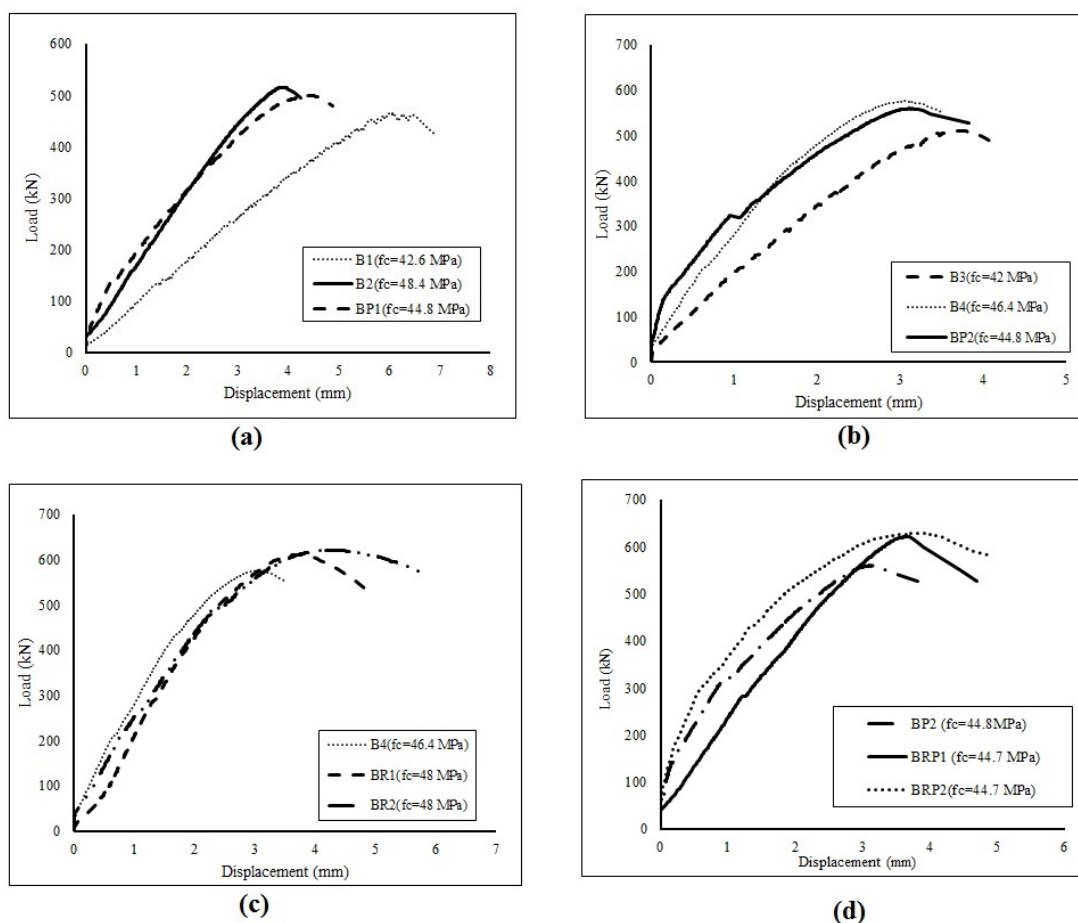
همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، تیرهای BR1 و BRP1 به وسیله‌ی ورق‌های CFRP به صورت U شکل تقویت شده و در تیرهای BR2 و BRP2 از آرایش CFRP عمود بر قطر برشی با عرض ۵ cm در یک وجه تیر استفاده شده است. تیر B4 به دلیل داشتن بتن با ضخامت بیشتر نسبت به نمونه‌های ۱۰ cm قبلی دچار ترک‌خوردگی کمتری شده است.

جدول (۵) نتایج حاصل از آزمایش تیرهای عمیق

نمونه‌ها	مقاومت استوان‌های بتن $f'_c \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$	بار ترک‌خوردگی (Ton)	بار اولین ترک برشی (Ton)	بار نهایی (Ton)	افت وسط تیر (cm)	نوع شکست
B1	۴۲۶	۱۲	۱۳/۸	۴۶/۷	۰/۶۰۴	برشی
B2	۴۸۴	۲۵	۲۸/۳	۵۱/۶	۰/۳۹۰	برشی
BP1	۴۴۸	۱۶/۹	۲۳/۴	۴۹/۹	۰/۴۴۳	برشی
B3	۴۲۰	۶/۹	۱۹/۱	۵۱/۱	۰/۳۷۵	خمشی-برشی
B4	۴۶۴	۳۸/۱	۳۸/۱	۵۷/۶	۰/۳۰۲	برشی
BP2	۴۴۸	۳۱/۹	۳۱/۹	۵۶	۰/۳۱۰	برشی
BR1	۴۸۰	برشی زیر FRP*	زیر FRP*	۶۱	۰/۳۶۹	برشی
BR2	۴۸۰	۳۶	۳۶	۶۲/۲	۰/۴۴۰	برشی
BRP1	۴۴۷	۲۲	زیر FRP*	۶۲/۲	۰/۳۶۵	برشی
BRP2	۴۴۷	۳۳/۵	۴۲/۵	۶۲/۸	۰/۳۹۱	برشی



شکل (۳) چگونگی خرابی تیرهای عمیق آزمایش شده



شکل (۴) منحنی بار-افت وسط دهانه تیرهای عمیق آزمایش شده

پاره شدن یا جدا شدن هر باند FRP بدلیل مقاومت دیگر باندها نمونه دچار خرابی نشده و تا پاره شدن آخرین باند مقاوم، نمونه دارای مقاومت بوده است. نمونه با جدا شدن باند قطری وسط وارد فاز خرابی شده است. این تیر در بار $62/2$ ton شکست که 8% بیشتر از بار خرابی تیر عمیق معمولی B4 بود. گفتن این نکته ضروری است که تقویت صورت گرفته در تیر BR2 تنها در یک وجه تیر است در حالی که حالت U شکل استفاده شده در تیر BR1 در دو وجه تیر چسبانده شده است. در صورت تقویت هر دو وجه تیر مانند آرایش بکار رفته در تیر BR2 می توان انتظار داشت که به مقاومت بالاتری دست یافته شود.

تیرهای BRP1 و BRP2 افزایش مقاومتی به اندازه 11% و 12% نسبت به تیر BP2 دارند. با دقت در جدول (۵) مشاهده می شود که اثر افزایش مقاومت با اضافه شدن FRP در تیرهای پیش تنیده بیشتر از تیرهای غیر پیش تنیده است. به عبارت دیگر با به

تیر B3 با دو آرماتور کمتر نسبت به B4 دچار ترک خوردگی بیشتری شده است. مقاومت نهایی و افت وسط تیر B4 نسبت به B3 به ترتیب $12/7\%$ افزایش و 20% کاهش داشته که قسمتی از این تغییرات مربوط به تفاوت مقاومت بتن دو نمونه است. مقاومت نهایی و بار ترک خوردگی تیر B4 کمی بیشتر از تیر BP2 است که دلیل آن مقاومت بالای بتن آن است. مقاومت نهایی و افت وسط تیر BP2 نسبت به B3 10% افزایش و 17% کاهش دارد.

تیر BR1 خرابی برشی به همراه لهیدگی یکی از تکیه گاهها را تجربه کرده است. در این تیر تا قبل از پاره شدن FRP مقاومت تیر در حال افزایش بوده که به یکباره بعد از پاره شدن FRP، ترک برشی در زیر FRP ایجاد شده و با ادامه بارگذاری، لهیدگی تکیه گاهی رخ داده است. افزایش مقاومت این نمونه نسبت به نمونه بدون FRP در حدود 6% است.

در تیر BR2 خرابی به صورت تدریجی بوده به گونه ای که با

عمیق پیش تنیده و مقاوم شده با FRP ارائه نشده و نمی توان مقایسه ای برای نتایج این تیرها انجام داد و لزوم دستیابی به چنین رابطه ای احساس می شود. در این بخش نتایج آزمایشگاهی با چهار رابطه از روابط موجود برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای عمیق معمولی (مبحث نهم مقررات ملی [۱۲]، ACI 318-99 [۱۳] ACI318-11 [۱۱] و محقق و همکاران [۱۴])، سه رابطه پیشنهادی برای تیرهای عمیق پیش-تنیده (تنگ و همکاران [۴]، تان و همکاران [۵] و وانگ و منگ [۶]) و یک رابطه پیشنهادی برای تیرهای عمیق تقویت شده با FRP (ژانگ و همکاران [۸]) مقایسه شده است. در جدول (۶) نتایج حاصل از روابط تحلیلی و نسبت بار نهایی به بار آزمایشگاهی نشان داده شده است. در بیشتر تیرها بار نهایی آزمایشگاهی بیشتر از تحلیلی است.

کارگیری CFRP در تیر پیش تنیده BP2 می توان به مقاومت بیشتری نسبت به استفاده از CFRP در تیر غیرپیش تنیده B4 با مقاومت یکسان با تیر پیش تنیده BP2 دست یافت. در منحنی بار-افت وسط تیرها ترک خوردگی تیر BP2 باعث افت محسوسی در منحنی شده است ولی برای تیر B4 با بار ترک خوردگی بیشتر از تیر BP2 چنین اتفاقی نیفتاده است. همچنین با توجه به شکل، پیش تنیده کردن باعث افزایش سختی اولیه تیر شده است. از روی شکل مشخص است که استفاده از FRP باعث افزایش مقاومت تیر شده است. تیر BRP2 بیشترین ظرفیت جذب انرژی و مقاومت را داراست.

۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نظری

برای آگاهی نویسندگان، در ادبیات فنی رابطه ای برای تیرهای

جدول (۶) مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش و روابط تحلیلی

بار نهایی بدست آمده از روابط تحلیلی (Ton)								بار نهایی آزمایشگاهی P_{ex} (Ton)	مقاومت فشاری بتن f'_c (kg/cm ²) c	λ (cm)	λ (cm)	λ (cm)
ژانگ و همکاران	وانگ و منگ	تان و همکاران	تنگ و همکاران	عربزاده و همکاران	ACI 318-11	ACI 318-99	مبحث نهم مقررات ملی					
۱۶ (۰/۳۴)	۱۲/۹ (۰/۲۸)	۳۳/۳ (۰/۷۱)	۲۷/۲ (۰/۵۸)	۲۵ (۰/۵۳)	۱۹/۴ (۰/۴۲)	۲۳/۸ (۰/۵۱)	۲۳ (۰/۴۹)	۴۶/۷	۴۲۶	۱۰		B1
۱۶ (۰/۲۹)	۱۴/۱ (۰/۲۷)	۴۳/۷ (۰/۸۵)	۲۸/۹ (۰/۵۶)	۲۵/۹ (۰/۵۰)	۳۳/۹ (۰/۶۶)	۲۴/۳ (۰/۴۷)	۲۳/۴ (۰/۴۵)	۵۱/۶	۴۸۴	۱۰		B2
---	۲۴/۶ (۰/۴۹)	۴۶/۵ (۰/۹۳)	۴۹/۳ (۰/۹۹)	---	۳۱/۵ (۰/۶۳)	---	---	۴۹/۹	۴۴۸	۱۰		BP1
۱۴/۸ (۰/۲۹)	۱۷/۵ (۰/۳۴)	۴۳/۶ (۰/۸۵)	۳۷/۲ (۰/۷۳)	۴۳/۱ (۰/۸۴)	۳۵/۶ (۰/۷۰)	۲۹/۲ (۰/۵۷)	۲۹/۸ (۰/۵۸)	۵۱/۱	۴۲۰	۱۴		B3
۱۶ (۰/۲۶)	۱۸/۸ (۰/۳۶)	۵۶/۵ (۰/۹۸)	۳۹ (۰/۶۸)	۴۳/۸ (۰/۷۶)	۴۷/۹ (۰/۸۳)	۳۰/۶ (۰/۵۳)	۳۰/۹ (۰/۵۴)	۵۷/۶	۴۶۴	۱۴		B4
---	۲۹/۶ (۰/۵۳)	۵۸/۵ (۱/۰۴)	۵۹/۸ (۱/۰۷)	---	۴۵/۳ (۰/۸۱)	---	---	۵۶	۴۴۸	۱۰		BP2
۲۲/۱ (۰/۳۶)	---	---	---	---	---	---	---	۶۱	۴۸۰	۱۴		BR1
۱۶/۷ (۰/۲۷)	---	---	---	---	---	---	---	۶۲/۲	۴۸۰	۱۴		BR2
---	---	---	---	---	---	---	---	۶۲/۲	۴۴۷	۱۴		BRP1
---	---	---	---	---	---	---	---	۶۲/۸	۴۴۷	۱۴		BRP2

تذکر: اعداد داخل پرانتز نسبت بار نهایی به دست آمده از رابطه به بار نهایی آزمایشگاهی است.

آرماتورهای جان تیر، A_{str} مساحت سطح مقطع آرماتورهای جان عمود بر محور عضو فشاری بوده و برابر است با:

$$A_{s_{str}} = A_v \cos \theta + A_h \sin \theta \quad (2)$$

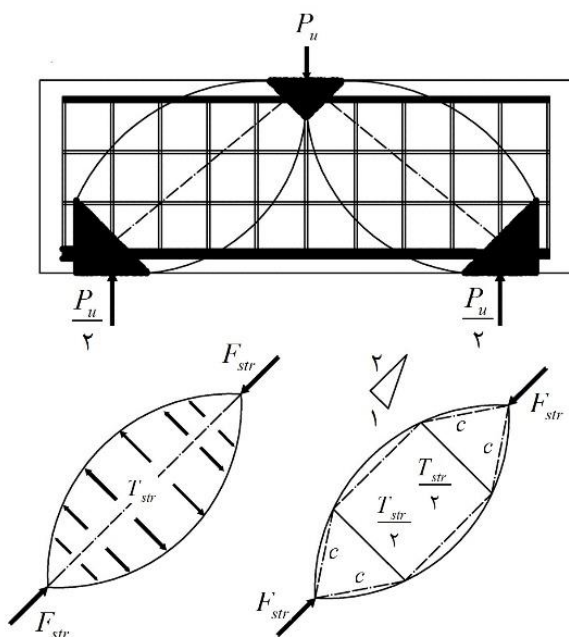
که در آن A_v و A_h به ترتیب سطح آرماتورهای قائم و افقی جان تیر و θ زاویه عضو فشاری با افق است.

f_t تنش کششی مقاوم بتن ترک نخورده در امتداد عمود بر ترک قطری است و می‌توان با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی موجود رابطه‌ای به صورت زیر برای آن در نظر گرفت:

$$f_t = \sqrt{\frac{h}{a}} (40 \rho_{str} + 1.33) \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

پارامتر $\sqrt{\frac{h}{a}}$ بیانگر اثر نسبت ارتفاع به دهانه برشی تیر است.

ρ_{str} نسبت آرماتورهای جان عمود بر محور عضو فشاری و f'_c مقاومت فشاری بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.



شکل (۵) مدل STM تحت بار متمرکز

در تیرهای عمیق پیش‌تنیده، با در نظر گرفتن مدل STM به صورت شکل (۶) و نوشتن روابط تعادل در آن، می‌توان به رابطه‌ای به صورت زیر برای پیش‌بینی بار نهایی تیرهای عمیق پیش‌تنیده دست یافت.

$$P_u = 2(F_1 \cos \theta_1 + F_{p_{str}} \sin \theta_s) \quad (4)$$

با توجه به جدول شماره (۶) با وجود این‌که به نظر می‌رسد که رابطه تان و همکاران برای تیرهای عمیق معمولی دارای جواب مناسب است، ولی این رابطه اساساً بر مبنای روش STM برای تیرهای عمیق پیش‌تنیده پیشنهاد شده است. نظر به استفاده از تئوری حد پایین در روش STM باید بیشتر جواب‌های به دست آمده از رابطه برای تیرهای عمیق پیش‌تنیده کوچکتر از جواب آزمایشگاهی باشد که اینگونه نیست. علاوه بر این، رابطه تان و همکاران [۵] معادلات تعادل نیرو و لنگ را ارضا نمی‌کند. توضیحات کامل رابطه تان و همکاران در مرجع شماره (۵) موجود است.

با توجه به جدول شماره (۶) می‌توان گفت که روابط بررسی شده قادر به پیش‌بینی مناسب مقاومت برشی تیرهای عمیق پیش‌تنیده آزمایش شده نیستند.

۵- روابط پیشنهادی

در این بخش رابطه‌ای برای پیش‌بینی بار نهایی تیرهای عمیق معمولی و پیش‌تنیده دو سر عمیق معمولی با استفاده از روش STM پیشنهاد شده است. با توجه به محدودیت حجم مقاله، خلاصه‌ای از روابط ارائه می‌شود. در تیرهای عمیق تحت بار متمرکز، عضو فشاری تشکیل شده مانند شکل (۵) به صورت بطری شکل است. در اعضای بطری شکل برای برقراری تعادل لازم است که در داخل عضو فشاری نیز نیروهای کششی وجود داشته باشد. خرابی عضو فشاری بطری شکل در اثر تشکیل ترک قطری و گسترش آن است. با تبدیل این عضو فشاری به مدل STM و نوشتن رابطه تعادل می‌توان نیروی محوری فشاری عضو فشاری را بر حسب نیروی کششی داخل آن به دست آورد. مقاومت کششی داخل عضو فشاری ناشی از مقاومت کششی بتن ترک‌نخورده و آرماتورهای عمود بر محور عضو فشاری است. بر همین مبنا می‌توان رابطه‌ای به صورت زیر برای بار نهایی تیر عمیق معمولی در نظر گرفت:

$$P_u = 4 \frac{h}{L_s} \left[f_t (L_s - B_s) t + \frac{(L_s - 3B_s)}{L_s} A_{str} f_y \right] \quad (1)$$

h ارتفاع مقطع تیر، L_s طول عضو فشاری، B_s عضو عرض فشاری در نزدیکی گره‌ها، t ضخامت تیر، f_y مقاومت تسلیم

علاوه بر افزایش مقاومت خمشی به تیری با مقاومت برشی مشابه و سختی اولیه و شکل پذیری بیشتر دست یافت.

جدول (۷) مقایسه نتایج روابط پیشنهادی با نتایج آزمایش

نمونه‌ها	بار نهایی آزمایشگاهی P_{ex} (Ton)	بار نهایی روابط پیشنهادی (Ton)	نسبت بار تحلیلی به آزمایشگاهی
B1	۴۶/۷	۴۲/۲	۰/۹۰
B2	۵۱/۶	۴۰/۹	۰/۷۹
BP1	۴۹/۹	۴۱/۸	۰/۸۴
B3	۵۱/۱	۵۶	۱/۰۹
B4	۵۷/۶	۵۵/۱	۰/۹۶
BP2	۵۶	۵۶/۷	۱/۰۱

ب- تیر عمیق پیش تنیده مقاوم شده با CFRP مقاومت و شکل-پذیری بیشتری نسبت به تیر عمیق معمولی مقاوم شده‌ای که آرماتورهای آن معادل آرماتورهای پیش تنیدگی است، دارد.

ج- افزایش مقاومت تیرهای عمیق پیش تنیده مقاوم شده به اندازه مجموع افزایش صورت گرفته در هر یک از نمونه‌های پیش تنیده شده یا تقویت شده به صورت جداگانه نیست و لازم است مدلی ارائه شود که اندرکنش پارامترهای موثر ناشی از پیش تنیدگی و FRP را بطور هم‌زمان در نظر بگیرد.

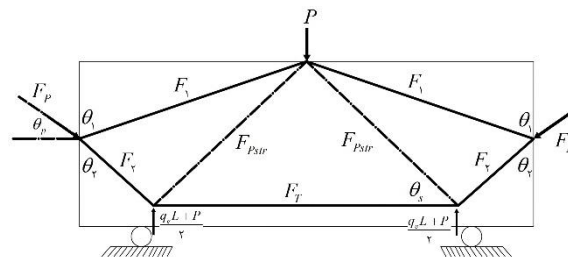
د- چنانچه دو تیر عمیق پیش تنیده و غیرپیش تنیده دارای ظرفیت برشی یکسانی باشند، با استفاده از CFRP در تیر پیش-تنیده می‌توان به بار نهایی بیشتری نسبت تیر عمیق غیرپیش-تنیده مقاوم شده با CFRP دست یافت.

ه- روابط پیشنهادی می‌توانند به خوبی بار نهایی تیرهای عمیق آزمایش شده در این پژوهش را پیش‌بینی نمایند.

و- هیچ‌کدام از روابط بررسی شده قادر به پیش‌بینی مناسب مقاومت برشی تیرهای عمیق پیش تنیده و مقاوم شده با FRP در این مقاله نیستند.

۷- مراجع

[1] Sargious, M., Tadros, G., "Stress and Forces in Deep Beams prestressed with straight cables", J Prestressed Concr Inst., 1974, 19 (4), pp. 86-99.



شکل (۶) مدل STM تیر عمیق پیش تنیده

نیروی F_{pstr} ایجاد شده در عضو فشاری تشکیل شده بین نقطه بارگذاری و تکیه‌گاه و F_1 نیروی ایجاد شده در عضو فشاری تشکیل شده بین نقطه بارگذاری و نقطه اعمال نیروی پیش-تنیدگی است.

با نوشتن رابطه سازگاری تغییرشکل‌ها در مدل خرابایی رابطه‌ای مانند زیر برای تعیین مقدار نیروی F_1 به دست می‌آید:

$$F_1 = \frac{F_{pstr} L_s \cos \theta_1}{L_1 \sin \theta_s} \quad (5)$$

که L_s طول عضو فشاری تشکیل شده بین نقطه بارگذاری و تکیه‌گاه و θ_s زاویه آن با افق می‌باشد. L_1 طول عضو فشاری تشکیل شده بین نقطه بارگذاری و نقطه اعمال نیروی پیش-تنیدگی و θ_1 زاویه آن با محور قائم است.

همان‌گونه که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود در مدل STM ارائه شده بار اعمال شده به تیر بین F_1 و F_{pstr} تقسیم می‌شود که باعث افزایش مقاومت تیر نسبت به نمونه تیر عمیق معمولی می‌شود. در جدول شماره (۷) نتایج به دست آمده از روابط پیشنهادی برای تیرهای عمیق معمولی و پیش تنیده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌گونه که در جدول شماره (۷) مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از روابط پیشنهادی نسبت به روابط بررسی شده دارای همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار ۱۰ تیر عمیق پیش تنیده و غیر پیش تنیده به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نظری نشان می‌دهد:

الف - ایده جایگزین کردن آرماتور پیش تنیدگی به جای آرماتورهای معمولی مناسب بوده و با انجام این کار می‌توان

- [9] Islam, M.R., Mansur, M.A, and Maalej, M., "*Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems*", Elsevier, Cement & Concrete Composites, 2005, Vol., 27, pp. 413-420.
- [10] Park, S., and Aboutaha, R.S., "*Strut-and-Tie Method for CFRP Strengthened Deep RC Members*", Journal of Structural Engineering, © ASCE / June 2009, pp. 632-643.
- [11] ACI 318-11, "*Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI318-11)*", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2011, 509 pp.
- [۱۲] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، " طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه"، وزارت راه و شهرسازی، معاونت امور مسکن و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲، ۳۷۱ صفحه.
- [13] ACI 318-99, "*Building requirements for structural concrete and commentary*", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999, 393 pp.
- [14] Arabzadeh, A., Rahaie, A.R. and Aghayari, R., "*A Simple Strut-and-Tie Model for Prediction of Ultimate Shear Strength of RC Deep Beams*", International Journal of Civil Engineering, September 2009, Volume 7, Issue 3, pp. 141-153.
- [2] Sargious, M., Dilger, W., "*Prestressed concrete Deep Beams with openings*", J Prestressed Concr Inst., 1977, 22 (3), pp. 64-79.
- [3] Alshegeir, A., and Ramirez, J. A., "*Strut-Tie Approach in Pretensioned Deep Beams*", ACI Structural Journal, 1992, Vol. 89, pp. 296-304.
- [4] Teng, S., Kong, F. K., and Poh, S. P. "*Shear strength of reinforced and prestressed concrete deep beams. Part II: the supporting evidence*" Proc., Instn. Civ. Engrs. Struct. and Build., 1998, Vol. 128, pp. 124-143.
- [5] Tan, K.H., Tong, K., and Tang, C.Y., "*Direct strut-and-tie model for prestressed deep beams*", ASCE J Struct Eng., 2001; 127(9), pp.1076-84.
- [6] Wang, G.L., and Meng, S.P., "*Modified strut-and-tie model for prestressed concrete deep beams*", Elsevier, Engineering Structures, 2008, Vol. 30, pp. 3489-3496.
- [7] Chaallal, O., Nollet, M-J., and Saleh, K., "*Use of CFRP strips for flexure and shear strengthening of RC members*" , Proc., 2nd Conf. on Composites in Infrastructure, H. Saadatmanesh, and M. R. Ehsani, eds., Univ. of Arizona, Tucson, Ariz., 1998, pp. 249-260.
- [8] Zhang, Z., Hsu, C.T. and Moren, J., "*Shear Strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates*", Journal of Composites for Construction, 2004, Vol. 8, No. 5, October 1, pp. 403-414.

