

بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح حاوی الیاف فولادی موجدار

مهدی نعمت‌زاده^۱، مرتضی نقی‌پور*^۲، رضا عباس‌نیا^۳ و مرتضی حسینعلی‌بیگی^۴

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۴ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

یکی از خطرناک‌ترین نوع خرابی‌های اعضا سازه‌های بتنی، گسیختگی آن‌ها در برش می‌باشد که موجب شکست ترد و ناگهانی عضو مورد نظر می‌شود به همین علت آئین‌نامه‌های متعدد، استفاده از آرماتورهای عرضی کافی در نواحی بحرانی را ضروری می‌دانند. استفاده از الیاف فولادی در بتن، موجب بهبود رفتار برشی و تبدیل رفتار ترد به رفتار شکل‌پذیر می‌شود. از این رو الیاف می‌توانند نقش مهمی را در رفع مشکل ذکر شده در بالا ایفا کنند. در این پژوهش تأثیر الیاف کوتاه فولادی موجدار بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح با مقاومت معمولی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه گروه انجام گرفت که در گروه اول بتن حاوی الیاف فولادی فاقد خاموت (BF)، در گروه دوم بتن فاقد الیاف فولادی دارای خاموت (BS) و در گروه سوم بتن حاوی الیاف فولادی دارای خاموت (BFS) بود. نتایج آزمایش نشان داد که با جایگزینی الیاف هم حجم به جای خاموت، می‌توان علاوه بر حفظ مقاومت به سختی و شکل‌پذیری بالاتری دست یافت. همچنین با افزودن الیاف فولادی، گسیختگی از مد برشی دور شده و به مد خمشی نزدیک می‌شود که این امر افزایش بیشتر مقاومت برشی در مقایسه با مقاومت خمشی را می‌رساند. ترک‌ها در تیرهای حاوی الیاف فولادی دارای فواصل و طول کوتاه‌تری بودند. این ترک‌ها به صورت ناپیوسته بوجود آمدند و بعد از تداوم بارگذاری به یکدیگر متصل شدند. همچنین ترک‌خوردگی و گسترش آن در این نوع تیرها، نسبت به تیرهای فاقد الیاف با صدای ملایم‌تری همراه بود که حاکی از بازتوزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها می‌باشد. نهایتاً می‌توان گفت برای بازتوزیع بهتر تنش‌ها و جلوگیری از وقوع ناگهانی ترک‌ها، افزایش میزان الیاف فولادی مؤثرتر از افزایش همان درصد حجمی خاموت است.

واژگان کلیدی: تیرهای SFRC، الیاف فولادی، رفتار برشی، بازتوزیع تنش، تیر، بتن آرمه، بتن الیافی.

۱- مقدمه

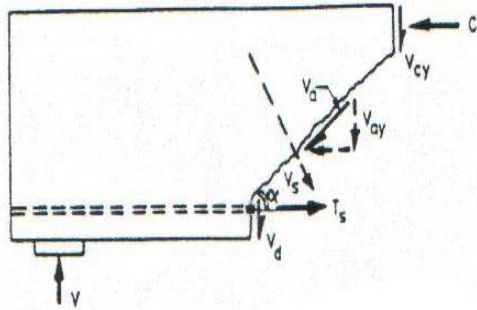
شده است. این تحقیقات از مدل‌هایی مبتنی بر اثر متقابل خمش و برش در تیرهای بدون تقویت برشی آغاز شد [۱-۳]. تعداد زیادی از تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف در بتن مسلح و نقش آن‌ها در تقویت برشی تیرها را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۱۵]. مزایای مهم الیاف در کمیته‌هایی همچون [۱۶] ACI 544 و [۱۷] RILEM TC 162-TDF [۱۷] به صورت اساسی مطرح شده است. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که استفاده از مقدار مناسب الیاف فولادی در بتن، مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد که از دلایل اصلی آن می‌توان به افزایش مقاومت کششی، به تأخیر انداختن ایجاد و رشد ترک‌ها، فاصله نزدیک‌تر میان الیاف در مقایسه با خاموت‌ها و در نهایت به تأثیر الیاف در مکانیزم کنترل ترک و توزیع مناسب‌تر ترک‌های کششی اشاره کرد. در عمل Narayanan و Darwish مشاهده کردند که الگوی ترک‌ها در تیرهای بتنی حاوی الیاف، شبیه به تیرهای بتنی مرسوم دارای خاموت می‌باشد [۶]. هر چند آن‌ها دریافته‌اند که بهبود در مقاومت برشی نهایی محسوس نبوده، اما مقاومت برشی متناظر با شروع ترک‌خوردگی به طور

نقش اصلی الیاف در بتن الیافی، مقاومت در مقابل ایجاد و رشد ترک‌ها، بهبود مقاومت کششی و افزایش کرنش نهایی این نوع بتن نسبت به بتن معمولی می‌باشد. الیاف فولادی چندین مزیت نسبت به میلگردهای برشی دارد:

- (۱) تکه‌های الیاف، به صورت تصادفی و در فواصل نزدیک‌تر نسبت به میلگردهای برشی قرار می‌گیرند.
- (۲) الیاف، مقاومت کششی قطری را از مرحله ترک‌خوردگی تا حالت نهایی افزایش می‌دهد.
- (۳) الیاف، مقاومت برش-اصطکاک را افزایش می‌دهد.

هرچند هزینه بالای الیاف فولادی و نبود روابط و ضوابط کافی برای طراحی سازه‌های بتن الیافی باعث عدم استفاده متداول از آن شده است، ولی استفاده از الیاف فولادی و حذف برخی از میلگردهای طولی و عرضی و در نتیجه کاهش هزینه تولید بتن مسلح، از موضوعات مهم صنعت بتن می‌باشد.

مطالعات زیادی برای تعیین مکانیزم تقویت مناسب برشی اعضای بتن آرمه انجام شد و مدل‌هایی تئوری نیز برای آن ارائه



شکل ۱- نیروها در ترک قطری تیر بتن مسلح حاوی الیاف فولادی

مقاومت برشی نهائی بتن مسلح به کمک روابط زیر قابل تخمین می باشد [۱۴]:

$$V_{uc} = \left(10\rho f'_c \frac{d}{a_s}\right)^{\frac{1}{3}} bd \quad \frac{a_s}{d} \geq 2.5 \quad (1)$$

$$V_{uc} = (160\rho f'_c)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d}{a_s}\right)^{\frac{4}{3}} bd \quad \frac{a_s}{d} \leq 2.5 \quad (2)$$

که در این روابط:

ρ = نسبت میلگردهای طولی، f'_c = مقاومت فشاری بتن (MPa)؛ d = عمق مؤثر تیر (m)؛ b = عرض تیر (m)؛ a_s = دهانه برشی (m)

به مقاومت حاصل از روابط ۱ و ۲ باید مقاومت برشی خاموت‌ها، $V_{us} = Avfyd/s$ را اضافه کرد که Av = سطح مقطع خاموت‌ها، f_y (MPa) = مقاومت تسلیم خاموت‌ها و S = فواصل خاموت‌ها (m) می باشد. بنابراین مقاومت برشی نهائی به صورت $V_u = V_{uc} + V_{us}$ خواهد بود.

در محاسبه تأثیر الیاف در مقاومت برشی، ابتدا باید عمق تار خنثی تعیین گردد. برای این منظور از تساوی ممان خارجی $(V_u a_s)$ با ممان نهائی داخلی (M_u) استفاده می شود [۱۴]:

$$M_u = 0.85 f'_c ab \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (3)$$

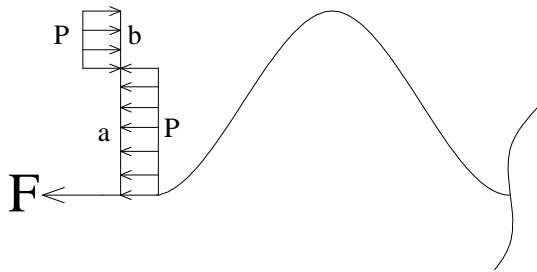
که A'_s سطح مقطع فولاد فشاری؛ f'_s تنش فولاد فشاری؛ d' فاصله فولاد فشاری از دورترین تار فشاری و a عمق بلوک مستطیلی ویتنی می باشد. از معادله (۳) می توان عمق بلوک مستطیلی تنش را تعیین نموده و با استفاده از آن می توان عمق تار خنثی را محاسبه کرد.

قابل توجهی افزایش می یابد. در مطالعه‌های دیگر آن‌ها نتیجه گرفتند که در اعضای سازه‌ای تحت نیروهای برشی زیاد، الیاف نمی تواند به طور کامل جایگزین خاموت‌ها شود هرچند بکار بردن آن مد گسیختگی را تغییر می دهد و از مد برشی ترد به مد خمشی شکل پذیر تبدیل می شود [۷]. در بسیاری از مقالات دیگر با انجام تعداد زیادی آزمایش، علاوه بر نتایج فوق، روابطی را برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای حاوی الیاف فولادی پیشنهاد کرده اند و بهبود رفتار تیرهای بتنی الیافی را به دلیل پدید آمدن عمل شاخه‌ای و رفتار قوسی تیرها دانسته اند [۴ و ۶]. همچنین این بهبود رفتار را می توان به تأثیر مقاومت بیرون کشیدگی الیاف بر عرض ترک‌های بتن ارتباط داد. تعدادی از محققین با ارائه یک سری روابط تجربی و مدل های تحلیلی، سهم الیاف را در مقاومت برشی نهایی ارزیابی کردند [۵ و ۶ و ۸-۱۵]. آن‌ها نشان داده اند که سهم مشارکت الیاف تا حد زیادی وابسته به درصد حجمی الیاف، هندسه الیاف و کیفیت اتصال سطحی میان الیاف و بتن می باشد. همچنین در سال‌های اخیر محققانی همچون Oh و Lim [۱۸] و Cucchiara و Mendola [۱۹] نیز تحقیقات زیادی در زمینه رفتار برشی تیرهای حاوی الیاف فولادی انجام دادند. کلیه این تحقیقات توسط الیاف بدون موج انجام گرفته است هرچند وجود این موج‌ها باعث کاهش کارایی بتن می شود، ولی نیروی بیرون کشیدگی الیاف را به اندازه قابل توجهی افزایش می دهد. از این رو کمبود آزمایشات و روابط تحلیلی برای بتن با الیاف فولادی موج دار، استفاده از این نوع الیاف را در کار حاضر ضروری ساخته است.

در این پژوهش از الیاف فولادی موج دار سینوسی با مقاومت پائین (2200 kg/cm^2) استفاده شده است. با ایجاد موج‌های سینوسی بر روی الیاف فولادی درگیری آن با بتن افزایش داده شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر الیاف فولادی موج دار در تیرهای بتن مسلح (SFRC) با خاموت و بدون خاموت، در مقاومت نهائی، نحوه ترک خوردگی، شکل پذیری تیرها و در نهایت نقش این الیاف‌ها در جایگزینی خاموت‌ها می باشد. از این رو، با افزودن الیاف فولادی موج دار در تیرهای بتن مسلح با خاموت و بدون خاموت، تأثیر الیاف فولادی در رفتار برشی این تیرها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- بررسی روابط تحلیلی

مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح حاوی الیاف فولادی را با استفاده از دیاگرام آزاد شکل (۱)، می توان از مجموع مقاومت برشی بتن، خاموت‌ها و الیاف بدست آورد.



شکل ۳- تنش‌های فشاری و کششی وارده بر الیاف از طرف بتن

$$M=0 \Rightarrow a=0.7h, b=0.3h \quad (۶)$$

$$F_{02} = P \left(0.4hd_f \right) \left(\frac{l_f}{2l_m} \right) \quad (۷)$$

که در رابطه فوق $0.4hd_f$ سطح فشاری کل می‌باشد و از آنجائی که طول بیرون زدگی الیاف $l_f/4$ است و در دو طرف هر موج، وضعیت تنش ذکر شده برقرار است از این‌رو $l_f/2l_m$ ، دو برابر تعداد کل امواج یک الیاف خواهد بود.

با توجه به وجود تمرکز تنش حاصل از فشار در محل تماس الیاف با بتن، فشار P برابر با نصف مقاومت فشاری بتن f'_c فرض می‌شود.

$$F_{02} = 0.1f'_c h l_f \frac{d_f}{l_m} \quad (۸)$$

بنابر این نیروی بیرون کشیدگی برای یک تکه الیاف به صورت زیر خواهد بود:

$$F_0 = 0.1f'_c h l_f \frac{d_f}{l_m} + \tau \pi d_f \frac{l_f}{4} \quad (۹)$$

نیروی کل بیرون کشیدگی در واحد سطح ترک به صورت زیر خواهد بود که n تعداد الیاف در واحد سطح ترک است:

$$F_l = nF_0 = 0.1nf'_c h l_f \frac{d_f}{l_m} + n\tau \pi d_f \frac{l_f}{4} \quad (۱۰)$$

با جایگذاری معادله (۴) در معادله (۱۰)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_l = 0.2V_f f'_c h \frac{l_f}{\pi l_m d_f} + 0.5\tau V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (۱۱)$$

طول ترک برشی مورب مساوی $(h-c)/\sin \alpha$ می‌باشد. تعداد الیاف (n) واقع در واحد سطح ترک را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

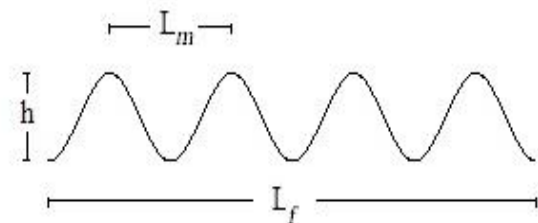
$$n = 0.5 \frac{V_f}{\pi r_f^2} \quad (۴)$$

V_f = درصد حجمی الیاف، r_f = شعاع الیاف
از آنجائی که طول بیرون زدگی الیاف $l_f/4$ است، در محاسبه نیروی میانگین بیرون کشیدگی الیاف، سهم تنش برشی سطح مشترک الیاف و بتن F_{01} به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_{01} = \tau \pi d_f \frac{l_f}{4} \quad (۵)$$

که τ مقاومت میانگین چسبندگی بین سطوح الیاف و بتن می‌باشد که نصف مقاومت برشی نهایی چسبندگی یعنی $\tau_i/2$ در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

در کار حاضر برای ایجاد نیروی بیرون کشیدگی بالاتر، از الیاف موج‌دار سینوسی استفاده شده است که حالت موجی الیاف باعث قفل و بست بیشتر میان بتن و الیاف می‌شود. از این‌رو جهت محاسبه اثر موج‌های الیاف، یک تکه الیاف موج‌دار سینوسی به صورت شکل (۲) را در نظر می‌گیریم که دارای طول موج l_m ، دامنه موج h و طول الیاف l_f می‌باشد. توزیع تنش در الیاف موج‌دار هنگام کشش الیاف، در شکل (۳) آورده شده است که جهت عدم ایجاد لنگر، قسمت پائینی در فشار و قسمت فوقانی در کشش می‌باشد. با فرض شدت یکنواخت تنش‌ها، برآیند این نیروها به نیروی بیرون کشیدگی اضافه می‌شود که روابط آن در ادامه آورده شده است.



شکل ۲- مشخصات هندسی الیاف موج‌دار سینوسی

جدول ۱- میزان مصالح موجود در یک متر مکعب بتن

مصالح	آب	سیمان	شن	ماسه	الیاف
وزن (kg)	200	444.4	1002.3	708.4	78.5

نیروی کل (F_t) عمود بر ترک برابر است با:

$$F_t = F_l b (h-c) / \sin \alpha \quad (12)$$

که مؤلفه قائم این نیرو ناشی از الیاف فولادی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{fy} = F_l \sin \alpha = F_l b (h-c) \quad (13)$$

در پایان مقاومت برشی کل تیر SFRC از مجموع معادلات (۱) و (۱۳) یا معادلات (۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$V_u = V_{uc} + V_{us} + V_{fy} \quad (14)$$

از معادله فوق مقدار تنش متوسط بدست می‌آید:

$$v_u = \frac{V_u}{bd} \quad (15)$$

۳- انجام آزمایشات

۳-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از مصالح با مشخصات زیر استفاده گردیده است:

(۱) آب

(۲) سیمان پرتلند معمولی تیپ II

(۳) ماسه از نوع رودخانه‌ای با ضریب نرمی ۳,۳۷

(۴) شن از نوع شکسته کوهستانی

(۵) الیاف فولادی از نوع موج‌دار سینوسی به قطر ۰/۷ میلی‌متر با طول موج ۴ میلی‌متر، ارتفاع موج ۱ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر ۸۰

در طرح اختلاط بتن معمولی از سیمان و سنگ‌دانه‌ها با مشخصات دانه‌بندی یکسان استفاده شده است که مقدار مصالح موجود در یک متر مکعب بتن در جدول (۱) بر حسب kg آورده شده است. مقاومت فشاری مکعبی نمونه‌ها حدود 480 kg/cm^2 به دست آمد.

۳-۲- طراحی سازه‌های تیر

در این تحقیق ۶ تیر در سه گروه BF، BS و BFS مورد آزمایش قرار گرفت. ابعاد کلیه نمونه‌ها با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی به صورت زیر انتخاب شد:

$$L=175 \text{ cm} \quad (\text{طول تیر})$$

$$L=160 \text{ cm} \quad (\text{طول دهانه})$$

$$b=15 \text{ cm} \quad (\text{پهنای مقطع})$$

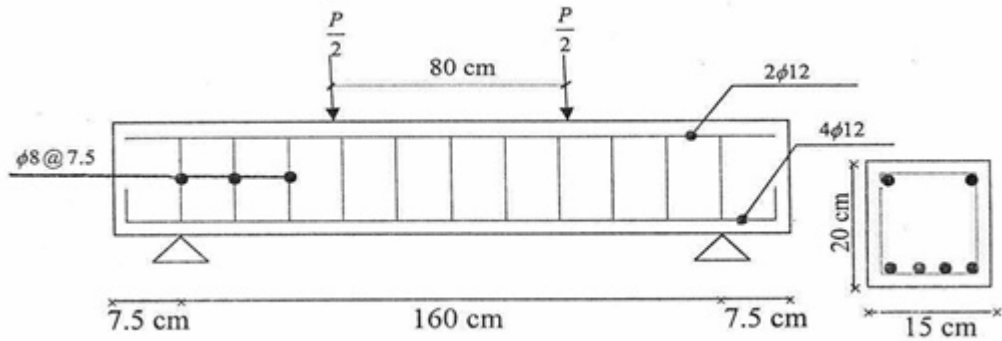
$$h=20 \text{ cm} \quad (\text{ارتفاع مقطع})$$

$$d=16.5 \text{ cm} \quad (\text{عمق مؤثر})$$

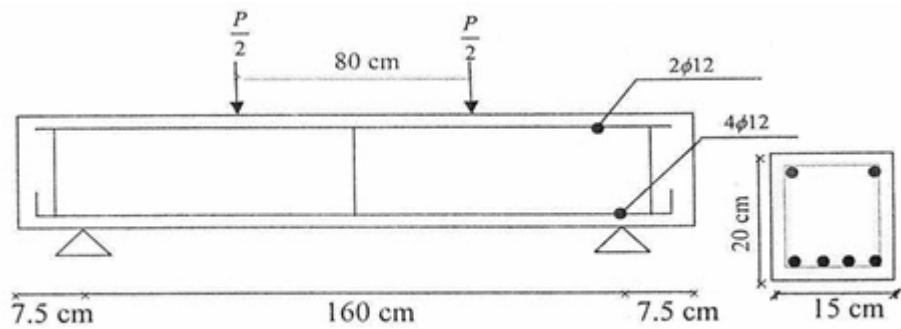
$d'=3 \text{ cm}$ (فاصله بالاترین تار فشاری تا مرکز سطح میلگردهای فشاری)

و همچنین $a/d=2.4$ (نسبت طول دهانه برشی به عمق مؤثر) انتخاب شد. درصد حجمی الیاف مورد استفاده در تیرهای بتنی حاوی الیاف فولادی (V_f) برابر ۱٪ بوده است. باید توجه داشت که درصد الیاف کمتر از حدود ۰/۵ درصد تأثیر بسیار ناچیزی بر روی خواص سازه‌ای بتن دارد و درصد الیاف بالاتر از ۲ درصد نیز باعث کاهش کارایی بتن و در نتیجه بالا رفتن پوکی و تخلخل بتن خواهد شد [۱۸].

به منظور بررسی ترک‌های برشی و جلوگیری از گسیختگی خمشی، تیرها به گونه‌ای طراحی شدند که ظرفیت خمشی آن‌ها بیشتر از ظرفیت برشی آن‌ها است. از این‌رو ۴ میلگرد $\phi 12$ در پائین و ۲ میلگرد $\phi 12$ در بالا قرار داده شده است. همچنین برای خاموت‌ها از میلگرد $\phi 8$ به فواصل 7.5 cm استفاده شد به طوری که درصد حجم خاموت‌ها برابر یک درصد بود. کلیه میلگردهای طولی و خاموت‌ها، آج‌دار و از نوع AII انتخاب شدند. مقاومت نظیر حد تسلیم آن‌ها مطابق داده‌های کارخانه سازنده حدوداً برابر ۳۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. مشخصات هندسی تیرها و بارهای وارده و نحوه آرماتورگذاری تیرها در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده است.

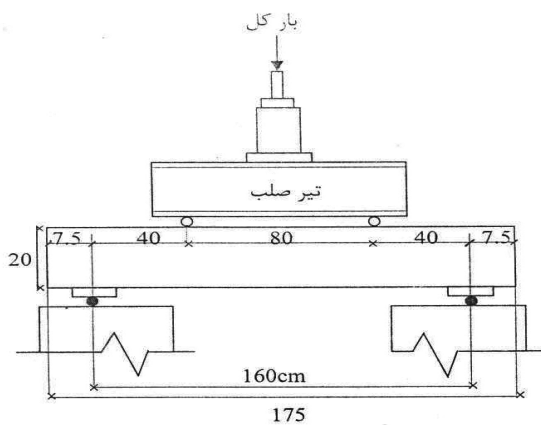


(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) آرماتورگذاری تیرهای دارای خاموت ب) آرماتورگذاری تیرهای بدون خاموت



شکل ۵- نحوه اعمال نیرو و محل نصب LVDT تیرهای آزمایش

۳-۳- آزمایش تیرها

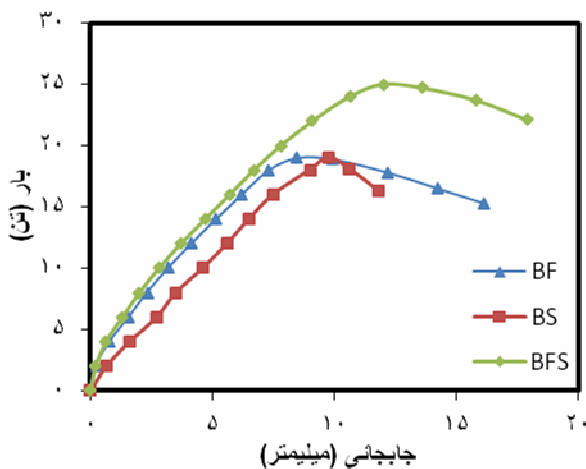
شکل (۵) نحوه اعمال نیرو بر روی تیرهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد که بار کل توسط یک تیر فولادی صلب به دو نقطه تیر بتنی می‌رسد. لود سل^۱ کالیبره شده بین جک و تیر فولادی قرار داده شد و بار اعمالی در چندین گام با نمو ۲ تن در هر گام، تا لحظه گسیختگی بر نمونه‌ها وارد شده است. در هر مرحله مقدار بار توسط لود سل و مقدار خیز مرکزی توسط یک LVDT نصب شده در وسط دهانه تیر ثبت شدند. کلیه داده‌های آزمایشگاهی در یک data logger با نمو زمانی مناسب ذخیره شدند. همچنین در هر گام بارگذاری، مقادیر کرنش‌های طولی در قسمت‌های تحتانی و فوقانی دهانه‌های خمشی و برشی توسط یک کرنش‌سنج مکانیکی^۲ با طول گیج ۲۰ سانتی‌متر قرائت و ثبت شد. ترک‌های ایجاد شده در هر مرحله از بارگذاری بر روی بدنه تیرها ترسیم و میزان نیروی متناظر با آن بر روی ترک‌ها ثبت شد.

1- Load Cell
2- Mechanical strain gauge

۴- بحث و بررسی نتایج آزمایش

۴-۱- بررسی رفتار نیرو - تغییر شکل مرکز تیر

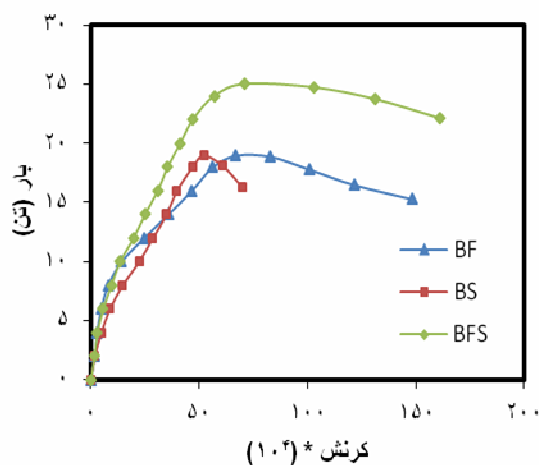
برای بررسی رفتار نیرو- تغییر شکل مرکز تیر، منحنی بار- تغییر شکل مرکز تیرهای حاوی الیاف بدون خاموت (BF) و تیرهای بدون الیاف با خاموت (BS) و تیرهای حاوی الیاف با خاموت (BFS) در شکل (۶) ترسیم شده است. با توجه به این که الیاف فولادی میزان مدول الاستیسیته را در ناحیه کششی و تا حدودی در ناحیه فشاری افزایش می‌دهد از این‌رو انتظار می‌رود که سختی خمشی (شیب منحنی $P-\delta$) در تیرهای حاوی الیاف فولادی دارای مقدار بیشتری باشد. مطابق شکل (۶) مشاهده می‌شود تیرهای حاوی الیاف BF و BFS تا قبل از نیروی حداکثر، دارای سختی بیشتر نسبت به تیرهای فاقد الیاف می‌باشند. از طرفی شیب منحنی تیرهای BF و BFS تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند که نشان می‌دهد فواصل کم خاموت‌ها در تیرهای حاوی الیاف، تأثیر ناچیزی بر سختی آن‌ها خواهد داشت. مطابق شکل (۶) ملاحظه می‌شود که با افزودن الیاف فولادی به تیرهای بتن مسلح علاوه بر افزایش سختی خمشی، شکل‌پذیری آنها نیز افزایش می‌یابد و این تیرها بعد از رسیدن به بار حداکثر با شیب اندکی مسیر طولانی را تا بار گسیختگی طی می‌کنند که این امر بیانگر قابلیت جذب انرژی بالاتر عضو مورد نظر است. از طرفی درصد حجمی خاموت‌های برشی بکار رفته در تیرهای بتن مسلح بدون الیاف یک درصد حجمی می‌باشد که برابر درصد حجمی الیاف بکار رفته در تیرهای حاوی الیاف می‌باشد که نتیجه می‌شود با جایگزینی درصدی از الیاف فولادی بجای همان درصد از خاموت، می‌توان به شکل‌پذیری بالاتری دست یافت. با مقایسه منحنی تیرهای BF و BS و تیرهای BS ملاحظه می‌شود که با جایگزینی یک درصد حجمی الیاف فولادی بجای یک درصد حجمی خاموت برشی، بار حداکثر ثابت می‌ماند و این الیاف می‌تواند همان میزان نیروی مقاوم برشی را ایجاد کند که خاموت‌ها ایجاد می‌کنند. همچنین در مقایسه تیرهای BFS و تیرهای BS ملاحظه می‌شود که با افزودن یک درصد الیاف، بار نهائی به میزان ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.



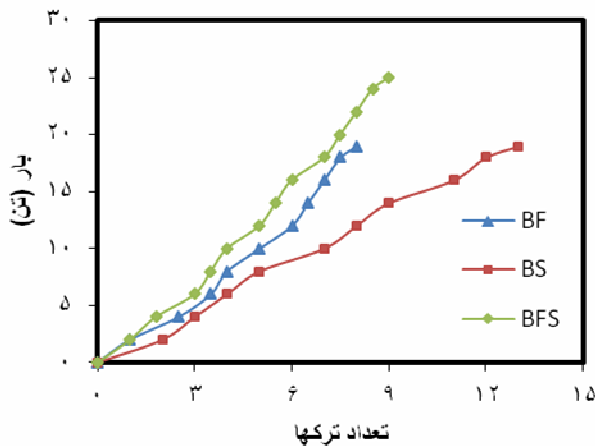
شکل ۶- منحنی نیرو- تغییر مکان مرکز تیرها

۴-۲- بررسی رفتار بار- کرنش در دهانه برشی و در ناحیه کششی

برای بررسی رفتار بار- کرنش در دهانه برشی و در ناحیه کششی، مقدار کرنش طولی در هر لحظه از بارگذاری توسط یک کرنش‌سنج مکانیکی با طول گیج ۲۰ سانتی‌متر ثبت شده و نتایج به صورت منحنی بار- کرنش در شکل (۷) ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که تا قبل از ایجاد ترک‌های اولیه در دهانه برشی، تیر BFS و تیر BF دارای شیب‌های برابر می‌باشند، اما با شروع ترک‌خوردگی، ترک‌های ایجاد شده در تیرهای BF توسط الیاف کنترل می‌شوند و دیگر اثر خاموت به عنوان یک کنترل کننده عرض ترک‌ها وجود ندارد. از این‌رو این ترک‌ها، (همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، دارای عرض زیاد خواهند بود که موجب می‌شود تغییر شکل و کرنش در دهانه برشی زیاد باشد.



شکل ۷- منحنی بار- کرنش در ناحیه کششی دهانه برشی

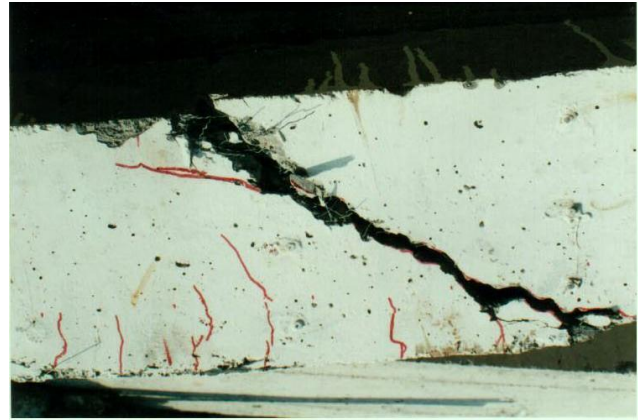


شکل ۹- منحنی نیرو- تعداد ترکها در ناحیه کششی دهانه برشی

۴-۳- بررسی رفتار بار- کرنش در دهانه خمشی و در ناحیه کششی

در ادامه برای بررسی رفتار بار- کرنش در دهانه خمشی و در ناحیه کششی، مقدار کرنش طولی در هر لحظه از بارگذاری توسط کرنش سنج مکانیکی با طول گیج ۲۰ سانتی متر ثبت شده و نتایج به صورت منحنی بار- کرنش در شکل (۱۰) ترسیم شده است. همچنین منحنی بار در مقابل تعداد ترکها در شکل (۱۱) ترسیم شده است.

مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ملاحظه می‌شود که تیرهای حاوی الیاف فولادی دارای تعداد ترکهای زیاد و در عین حال دارای شیب کمتری در منحنی نیرو- کرنش در مقایسه با تیرهای فاقد الیاف می‌باشند چرا که وجود الیاف باعث می‌شود که قسمتی از تنش‌ها در دهانه خمشی توسط الیاف انتقال یابد که این خود موجب افزایش تعداد ترکها با عرض محدود و از طرف دیگر باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در این ناحیه خواهد شد. در نتیجه، ترکها در نقاط مختلف دهانه CD به شکل تقریباً یکسانی پراکنده می‌شوند. در ادامه شیب اندک منحنی تیرهای حاوی الیاف پس از بار حداکثر نشان دهنده شکل پذیری بالای این دسته از تیرها می‌باشد که باعث از بین رفتن گسیختگی ترد می‌گردد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نحوه ترک خوردگی نمونه‌هایی از تیرها را نمایش می‌دهند.



(الف)

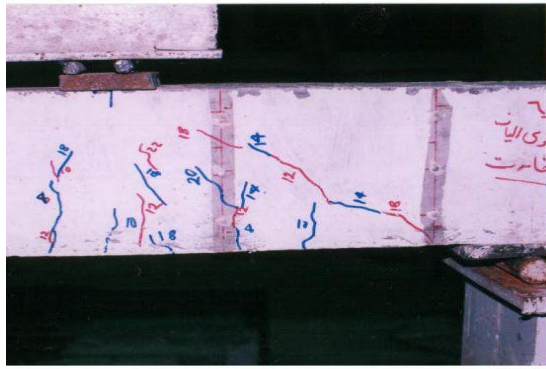


(ب)

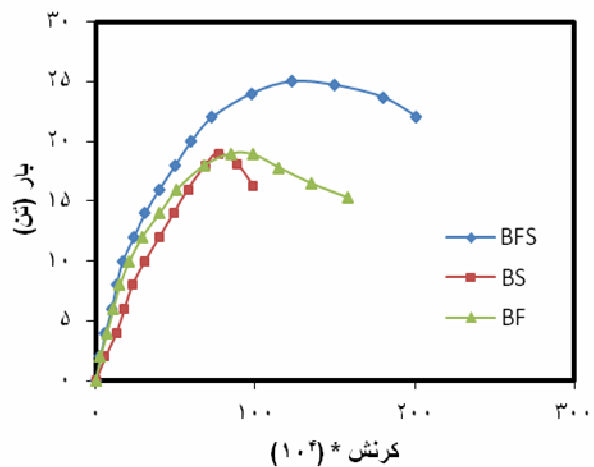
شکل ۸- (الف) گسیختگی تیر BF در دهانه برشی (نمونه اول)
(ب) گسیختگی تیر BF در دهانه برشی (نمونه دوم)

شیب منحنی بعد از شروع ترک خوردگی به میزان زیادی کاهش یابد؛ ولی در تیرهای BFS، خاموت‌ها، قسمت ترک خورده بتن را به صورت یک توده نگه می‌دارند و تغییر طول دهانه برشی اندک و شیب منحنی نیز تندتر و یکنواخت‌تر خواهد بود. همچنین کرنش نهائی در تیرهای حاوی الیاف حدود دو برابر تیرهای فاقد الیاف می‌باشد که نقش مهم الیاف در افزایش شکل پذیری تیرها را می‌رساند.

شکل (۹) منحنی تعداد ترکهای مشاهده شده نسبت به نیرو در دهانه برشی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تعداد ترکها در ناحیه برشی، با افزودن الیاف فولادی به تیرهای بتن مسلح، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و با توجه به شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود که این ترکها در ناحیه خمشی افزایش می‌یابند. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف فولادی در تیرهای بتن مسلح، مقاومت برشی را بیشتر از مقاومت خمشی افزایش می‌دهد.



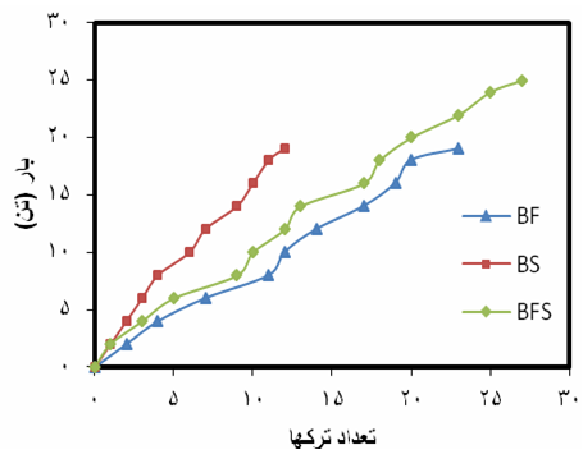
شکل ۱۳- نحوه ترک خوردگی تیر BFS در دهانه برشی



شکل ۱۰- منحنی بار- گرنش در ناحیه کششی دهانه خمشی

۵- مقایسه برش نهایی تئوری و آزمایشگاهی

با توجه به تئوری ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده می‌توان صحت روابط ارائه شده را بررسی کرد. از آنجایی که تیرها از لحاظ خمش نسبت به برش، قوی‌تر طراحی شده‌اند، گسیختگی آن‌ها در دهانه برشی خواهد بود. بنابراین میزان برش مقاوم نهایی مطابق روابط (۱) تا (۱۳) در جدول (۲) آورده شده است. لازم به ذکر است که عدد 0.6 در محاسبات نیروی برشی تیرهای BF اثر سه خاموتی هستند که دو عدد از آن‌ها در محل تکیه‌گاه‌ها و یکی از آن‌ها در وسط تیر برای نگهداری میلگردهای طولی تعبیه شده‌اند.

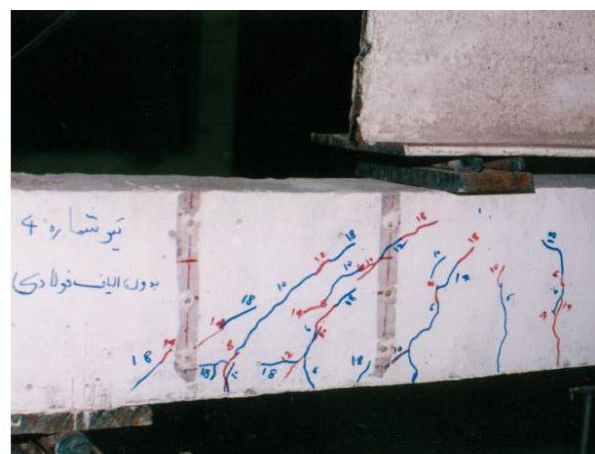


شکل ۱۱- منحنی نیرو- تعداد ترکها در ناحیه کششی دهانه خمشی

جدول ۲- برش مقاوم نهایی تئوری

نوع تیر	V_{uc} برش بتن	V_{us} برش خاموت	V_{fy} برش الیاف	V_u برش تئوری کل
BFS	4.0	5.2	4.4	13.6
BF	4.0	0.6	4.4	9.0
BS	4.0	5.2	-	9.2

نتایج برش مقاوم تئوری و آزمایشگاهی برای کلیه تیرها در جدول (۳) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تیرهای فاقد الیاف، کمترین خطا را در مقایسه روش تئوری با نتایج آزمایشگاهی دارند و خطا در تیرهای حاوی الیاف به دلیل رفتارهای ناشناخته و نبود روابط دقیق‌تر می‌باشد.



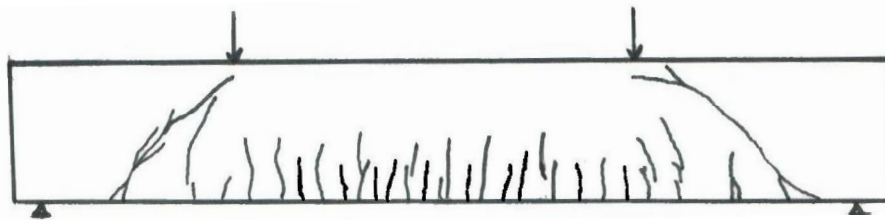
شکل ۱۲- نحوه ترک خوردگی تیر BS در دهانه برشی

جدول ۳- مقایسه نتایج تئوری و آزمایشگاهی

نوع تیر	نتایج تئوری	نتایج آزمایشگاهی	اختلاف نتایج %
BFS	13.6	12.5	8.8
BF	9.0	9.5	5.3
BS	9.2	9.5	3.2

۶- بررسی الگوی ترک‌ها

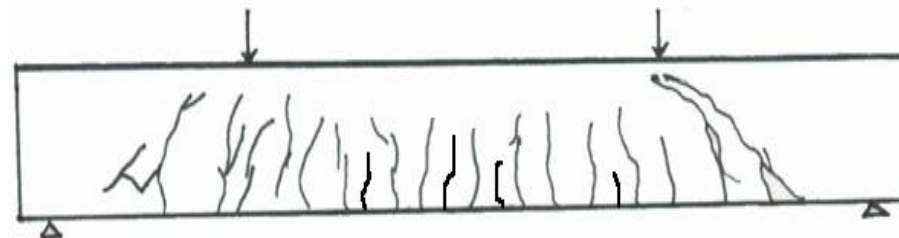
شکل‌های (۱۴) تا (۱۹) الگوی ترک تیرها را نمایش می‌دهند. کلیه تیرها با توجه به بالا بودن ظرفیت خمشی تحت برش گسیخته شده‌اند. شکل ترک‌ها نسبت به محور وسط تیر تا حدود زیادی متقارن می‌باشد. توزیع تصادفی الیاف فولادی از جمله عواملی می‌باشد که تقارن کامل الگوی ترک‌ها را در تیرهای حاوی الیاف، از بین می‌برد.



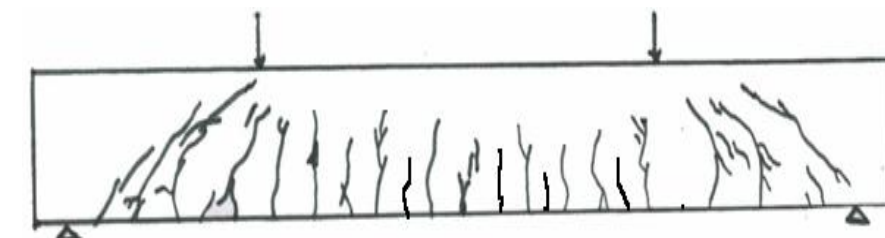
شکل ۱۴- الگوی ترک تیرهای BF (نمونه اول)



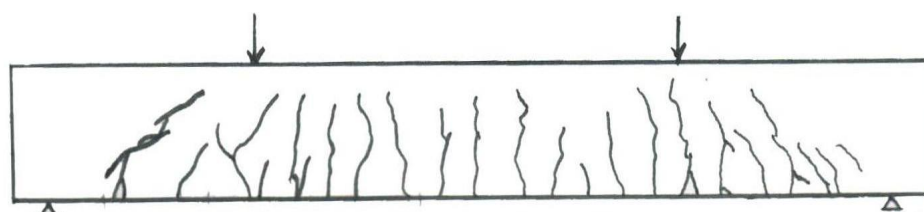
شکل ۱۵- الگوی ترک تیرهای BF (نمونه دوم)



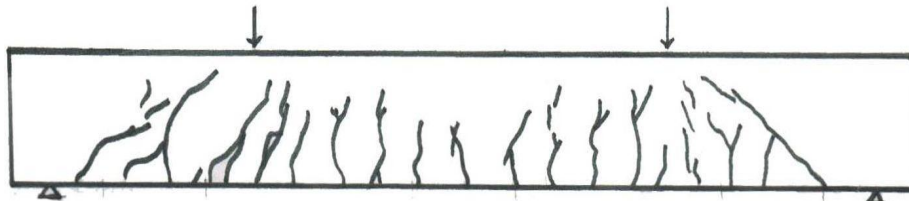
شکل ۱۶- الگوی ترک تیرهای BFS (نمونه اول)



شکل ۱۷- الگوی ترک تیرهای BFS (نمونه دوم)



شکل ۱۸- الگوی ترک تیرهای BS (نمونه اول)



شکل ۱۹- الگوی ترک تیرهای BS (نمونه دوم)

ترک گسسته برشی که به تدریج به یکدیگر متصل می‌شدند، همراه می‌باشد.

۴- گسیختگی نهایی در تیرهای حاوی الیاف ناشی از عدم توزیع و انتقال بیشتر تنش در محل ترک‌ها به دلیل جاری شدن الیاف می‌باشد.

۵- در صورت استفاده از الیاف مقاومت پایین (2200kg/cm^2) اگر چه می‌توان به فواید مطلوب دست یافت اما در مقایسه با الیاف فولادی مقاومت بالا به مقدار بیشتری از این نوع الیاف جهت افزایش مقاومت برشی نیاز می‌باشد که این امر موجب کاهش اسلامپ و کارایی بتن می‌گردد. اگر بتوان مشکل اسلامپ و کارایی پائین بتن را بر طرف نمود (که این امر در حال حاضر فقط برای درصدهای حجم کم الیاف امکان‌پذیر است) استفاده از الیاف مقاومت پایین می‌تواند یک راه حل مناسب برای رسیدن به مقاومت مورد نظر باشد.

۷- مراجع

- [1] Kani, G. N. J., "Basic Facts Concerning Shear Failure", ACI J Proc, 1966, 63 (6), 675-92.
- [2] Ba-zant, Z. P., Kim, J. K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams", ACI J, 1984, 81 (5), 456-68.
- [3] Russo, G., Zingone, G., Puleri, G., "Flexure-Shear Interaction Model for Longitudinally Reinforced Beams", ACI Struct J, 1991, 88 (1), 60-8.
- [4] Swamy, R. N., Bahia H. M., "Influence of Fiber Reinforcement on the Dowel Resistance to Shear", ACI J, 1979, 76 (2), 327-55.
- [5] Sharma, A. K., "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI J Proc, 1986, 83 (4), 624-8.
- [6] Narayanan, R., Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fiber as Shear Reinforcement", ACI Struct J, 1987, 84 (3), 216-27.
- [7] Narayanan, R., Darwish, I. Y. S., "Shear in Mortar Beams Containing Fibres and Fly

در تیرهای BS، گسیختگی با چند ترک اصلی و ممتد برشی همراه بود اما در تیرهای حاوی الیاف (BF و BFS) گسیختگی با چندین ترک گسسته برشی که به تدریج به یکدیگر متصل شدند، همراه بود. این امر نشان دهنده عملکرد مناسب الیاف فولادی در رفتار برشی تیرهای حاوی الیاف فولادی و نقش مؤثر الیاف در بازتوزیع مناسب تنش‌ها می‌باشد. همچنین ترک‌ها در تیرهای بتنی فاقد الیاف فولادی، نسبت به تیرهای حاوی الیاف، حدوداً بلندتر و عریض‌تر بوده و بعضاً با ترک‌های ناگهانی همراه بود. اما در تیرهای حاوی الیاف فولادی، ترک‌ها تدریجی و با صدای ملایم‌تری همراه بود که نشان می‌دهد افزودن الیاف موجب بازتوزیع بهتر تنش‌های کششی و بنابر این کاهش و گسسته شدن ترک‌های کششی می‌گردد و ترک‌ها با عرض و فاصله کمتر در بازه بزرگ‌تر نسبت به تیرهای فاقد الیاف رخ می‌دهد.

همچنین با مشاهده دهانه برشی تیرهای BS (به فواصل خاموت 7.5 cm) و تیرهای BF (دو خاموت در کناره‌ها و یک خاموت در وسط دهانه) ملاحظه می‌گردد که اگر میزان فاصله خاموت‌ها زیاد شود ولی در مقابل درصد الیاف افزایش یابد (با حفظ درصد حجمی مجموع آن‌ها) از میزان ترک‌های برشی کاسته می‌شود.

۷- نتایج

۱- با جایگزینی الیاف فولادی به جای قسمتی از خاموت‌ها علاوه بر ثابت ماندن مقاومت حداکثر می‌توان به شکل‌پذیری بالاتری نیز دست یافت. برای بهبود شکل‌پذیری و جلوگیری از ترک‌های ناگهانی، افزودن الیاف فولادی (حتی با مقاومت پایین) مؤثرتر از افزایش خاموت‌ها می‌باشد.

۲- در تیرهای فاقد الیاف فولادی، عرض و ارتفاع ترک‌ها بیشتر از تیرهای حاوی الیاف فولادی است.

۳- در تیرهای بدون الیاف، گسیختگی با ترک‌های اصلی و ممتد برشی همراه بوده اما در تیرهای حاوی الیاف گسیختگی با چند

- [14] Oh, B., Lim, D., Hong, K., Yoo, S., Chae, S., "Structural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams in Shear", ACI Struct J, 1992, 182 (2), 9-27.
- [15] Swamy, R. N., Al-Ta'an, S. A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams with Steel Fiber Concrete", ACI Struct J, 1981, PP 356-405.
- [16] ACI Committee 544, "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Struct J, 1988, 85 (5), 563-80.
- [17] Rilem TC-162-TDF, "Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete", Mater Struct, 2000, 33 (226), 75-81.
- [18] Lim, D. H., Oh, B. H., Experimental and Theoretical Investigation on the Shear of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams", Engineering Structures, 1999, 21, 937-944
- [19] Mendola, L., Cucchiara, C., Papia, M., "Effectiveness of Stirrups and Steel Fibres as Shear Reinforcement", Cement & Concrete Composites, 2004, 26, 777-786.
- Ash", J Struct Eng ASCE, 1988, 114 (1), 84-102.
- [8] Al-Ta'an, S. A., Al-Feel, J. R., "Evaluation of Shear Strength of Fibre Reinforced Concrete Beams", Cem Concr Compos, 1990, 12 (2), 87-94.
- [9] Ashour, S. A., Hasanain, G. S., Wafa, F. F., "Shear Behavior of Highstrength Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Struct J, 1992, 89 (2), 176-84.
- [10] Swamy, R. N., Jones, R., Chiam, A. T. P., "Influence of Steel Fibres on the Shear Resistance of Lightweight Concrete T-Beams", ACI Struct J, 1993, 90 (1), 103-14.
- [11] Oh, B. H., Lim, D. H., Yoo, S. W., Kim, E. S., "Shear Behaviour and Shear Analysis of Reinforced Concrete Beams Containing Steel Fibres", Mag Concr Res, 1998, 50 (4), 283-91.
- [12] Khuntia, M., Stojadinovic, B., Goel, S. C., "Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups", ACI Struct J, 1999, 96 (2), 282-9.
- [13] Noghabai, K., "Beams of Fibrous Concrete in Shear and Bending: Experiment and Model", J Struct Eng ASCE, 2000, 126 (2), 243-51.