

تأثیر الیاف فولادی بر ترک خمشی و گسترش ترک در تیرهای بتن مسلح دارای وصله*

آرش کریمی پور^(۱)محمد رضا اصفهانی^(۲)

چکیده در این پژوهش، تأثیر افزودن درصد حجمی مختلف از الیاف فولادی در تیرهای دارای طول وصله آرماتور کششی مختلف بر ترک خوردگی و مسیر گسترش ترکها تحت بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام این بررسی کاهش حداقل عرض ترک خوردگی به‌ازای افزودن الیاف فولادی در تیر بتن مسلح دارای وصله آرماتور کششی بود. ده نمونه تیر آزمایشگاهی به عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۲۳۰۰ میلی‌متر با طول وصله میلگرد کششی مختلف و درصد متفاوتی از الیاف فولادی ساخته شد. چهار عدد از نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و شش عدد تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داده شد. از بین نمونه‌ها یک نمونه به‌عنوان نمونه شاهد و فاقد وصله و الیاف فولادی بود. در نه نمونه دیگر از الیاف فولادی با درصد حجمی ۰، ۱ و ۲ استفاده شده بود. آزمایش‌ها به‌صورت خمش چهارنقطه‌ای انجام شد. در آزمایش‌ها، مسیر گسترش ترک خوردگی در طول تیر و عرض ترک خوردگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن الیاف فولادی سبب کاهش لغزش آرماتورهای کششی در محل وصله می‌شود و عرض ترک خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین با افزودن الیاف فولادی از ۱ به ۲ درصد حجمی، ترکها به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی بتن الیافی، بارگذاری چرخه‌ای، ترک خوردگی، وصله آرماتورهای کششی.

Effect of Steel Fibers on Flexural Cracking of Fiber Reinforced Concrete Beams with Lap-Spliced Bars

A. Karimipour

M. Reza Esfahani

Abstract In this research, the effect of steel fibers on flexural cracking of fiber reinforced concrete beams with lap-spliced bars under static and loading/unloading cycles was investigated. Ten specimens of laboratory beam with the section width of 150mm, height of 200mm and length of 2300mm and with different splice lengths of tension rebars and different percentages of steel fibers were manufactured and tested. Four specimens were subjected to static loads and six specimens were subjected to loading/unloading cycles. Among the specimens, one was selected as the control specimen without having lap-spliced bars and steel fibers. Other 9 specimens were made using steel fibers with different volumetric percentages of 0, 1 and 2. The specimens were conducted under four-point bending tests. It was shown that the flexural crack width in beams decreases with increasing the volume percentage of steel fiber, significantly. Steel fibers in specimens subjected to static loading and loading/unloading cycles increased the energy dissipation.

Key Words Steel fibers, Flexural cracking, Concrete beams, Spliced bars.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۹۵ تاریخ پذیرش آن ۹۶/۸/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

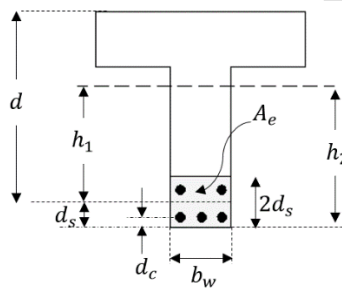
(۲) نویسنده مسئول: استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

تعیین عرض ترک خوردگی به طور دقیق امکان پذیر نیست و به مسائل مختلفی وابسته است. روابط تجربی زیادی توسط محققان برای تعیین عرض ترک ارائه شده است. در این میان رابطه تجربی گرگلی- لوتز [4] در تعیین عرض ترک خمشی از اعتبار بیشتری برخوردار است. رابطه گرگلی- لوتز عرض ترک خمشی، w را بر حسب میلی متر، به صورت زیر تعیین می کند:

$$w = (1.08 \times 10^{-5}) \beta_h f_s^3 \sqrt{d_c A} \quad (1)$$

در این رابطه β_h نسبت فاصله محور خشی از دورترین تار کششی به فاصله تار خشی از مرکز سطح میلگردهای کششی $(\frac{h_1}{h_2})$ است و f_s تنش در فولادهای کششی مقطع تا مرکز نزدیک ترین میلگرد کششی و A سطح کششی مؤثر بتن پیرامونی میلگرد کششی است که از تقسیم سطح مقطع مؤثر بتن پیرامونی فولادهای کششی $(A_e = 2d_s b_w)$ بر تعداد میلگردهای کششی N به دست می آید $(A = \frac{A_e}{N})$. متغیرهای مورد استفاده در رابطه (۱) در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایش متغیرهای به کاررفته در تعیین عرض ترک خوردگی

خمشی براساس رابطه گرگلی- لوتز [4]

لازم به ذکر است که در جای گذاری کمیت β_h در رابطه (۱) می توان به جای یک محاسبه دقیق تر از مقدار ۱-۲ در تیرها و ۱,۳۵ در دال های یک طرفه استفاده کرد. همچنین منطقی خواهد بود که از مقدار $f_s \approx 0.6f_y$ به جای یک محاسبه دقیق تر در تعیین تنش فولاد کششی تحت بارهای بدون ضریب استفاده شود.

علل برخی خرابی ها در تیرها و ستون ها خوردگی آرماتورها و کاهش سریع مقاومت خمشی است. ضعف بتن در مقابل کشش سبب ترک خوردگی نمونه بتن مسلح می شود و امکان نفوذ مواد شیمیایی را در اعضای بتنی امکان پذیر می سازد. این امر می تواند سبب زنگ زدگی و خوردگی آرماتورها شود. در تیرهای دارای وصله آرماتور کششی کاهش مقاومت پیوستگی و لغزش آرماتور می تواند سبب افزایش ترک خوردگی و عرض ترک شود. با توجه به مسیر گسترش ترک خوردگی و عرض آنها الگوهای خوردگی و فرسایش برای تیرهای بتن مسلح تحت شرایط محیطی متفاوت تعیین شده است. ورود مواد اسیدی در طی ترک خوردگی ها خطر گسیختگی تیر را افزایش می دهد که با افزایش پوشش روی بتن و یا استفاده از بتن با مقاومت بالاتر می تواند تا حدودی رسیدن این مواد به آرماتورها را کاهش دهد [1]. افزایش کرنش در آرماتورهای طولی و کاهش مقاومت بتن سبب افزایش بیشتر لغزش آرماتور در بتن می شود و عرض ترک خوردگی ها افزایش می یابد [2]. آیین نامه ها معمولاً در شرایط مختلف بهره برداری عرض ترک را در حدود ۰,۱ تا ۰,۴ میلی متر محدود می کنند. [۳] ACI-224R محدوده مجاز عرض ترک خوردگی را در شرایط بهره برداری گوناگون براساس جدول (۱) بیان می کند.

جدول ۱ حداکثر مجاز عرض ترک خوردگی براساس ACI 224

عرض مجاز ترک (mm)	شرایط محیطی عضو
۰,۴۱	هوای خشک
۰,۳۰	هوای مرطوب با خاک
۰,۱۸	مواد شیمیایی یخ زدا
۰,۱۵	آب دریا و یا پاشش آب دریا
۰,۱۰	مخازن محتوی آب

هستند. این الیاف بسته به نوع کاربردشان دارای شکل و اندازه‌های مختلفی می‌باشند [10]. استفاده از الیاف فولادی باعث کاهش عرض ترک خوردگی و بازتوزیع بهتر تنش می‌شود. همین امر سبب بهبود مقاومت پیوستگی آرماتورها می‌گردد. زمانی که عضو دارای الیاف تحت خمش قرار می‌گیرد، حضور الیاف فولادی سبب بهبود عملکرد عضو خمشی می‌شود. استفاده از الیاف در محل ترک خوردگی باعث می‌شود تا عرض ترک دیرتر گسترش یابد. در اعضای بتن مسلح، افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت خمشی و ضربه‌ای می‌شود. با افزایش درصد الیاف می‌توان افزایش مقاومت عضو بتن مسلح را بهبود بیشتری داد [11].

طول وصله نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش، طبق رابطه پیشنهادی اصفهانی و کیانوش [۱۲] که تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های مختلف گذشته دارد، توسط رابطه (۳) محاسبه شده‌است.

$$l_d = \frac{T}{a\sqrt{f'_c}} = \frac{A_b f_s}{a\sqrt{f'_c}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، A_b و f_s به ترتیب مساحت آرماتورهای طولی و تنش کششی آرماتور هستند. زمانی که آرماتور به تسلیم برسد، در رابطه (۳) از f_y استفاده می‌شود و $a = 7.2d_b \frac{\frac{c}{d_b} + 0.5}{\frac{c}{d_b} + 3.6}$ زمانی در رابطه (۳) قابل قبول است که مقدار مشخصی خاموت در طول وصله قرار داده شود. برای جزئیات بیشتر به مرجع [۱۲] مراجعه شود. به منظور افزایش پیوستگی بین آرماتور و بتن و کاهش عرض ترک خوردگی، با افزودن درصد حجمی مختلف الیاف فولادی به نمونه‌ها، به تأثیر الیاف بر عرض ترک خوردگی و نحوه گسترش امتداد ترک‌ها در اعضای دارای این الیاف پرداخته شده‌است.

بررسی‌های آزمایشگاهی

مشخصات نمونه‌ها و فرایند انجام آزمایش. در ساخت بتن الیافی از الیاف فولادی با انتهای خمیده به طول ۵

حداکثر عرض ترک خوردگی در یک عضو بتن آرمه تحت کشش مستقیم را نیز می‌توان براساس رابطه برومز- لوتز [۵] به صورت زیر تعیین کرد:

$$w_{max} = (1.45 \times 10^{-5}) f_s^3 \sqrt{d_c A} \quad (2)$$

افزون بر این، با استفاده از افزودنی‌هایی نظیر الیاف پلی پروپیلن و پوزولان یا راهکارهایی نظیر افزایش مقاومت بتن، می‌توان عرض ترک خوردگی‌ها و گسترش امتداد آنها را کاهش داد. استفاده از ورق‌های FRP می‌تواند سبب افزایش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح شود و با انتقال مناسب تنش در سراسر میلگردهای کششی باعث کاهش ترک خوردگی در تیرهای بتن مسلح گردد [6]. رسیدن اکسیژن به آرماتور سبب اکسایش آن می‌شود و باعث ترک خوردن آرماتور و در نهایت آن گسیختگی می‌گردد. از این رو، استفاده از پوشش اپوکسی بر روی میلگردها می‌تواند سبب مقاومت در برابر اکسایش و خوردگی شود [7]. افزودن الیاف فولادی بر بتن مسلح با افزایش مقاومت پیوستگی و کاهش لغزش آرماتور می‌تواند سبب کاهش عرض ترک خوردگی شود. در تیرهای دارای وصله به دلیل ایجاد وصله، لغزش آرماتور بیشتر می‌شود و همین امر سبب افزایش عرض ترک خوردگی در محل ایجاد وصله آرماتور کششی می‌شود. استفاده از این الیاف باعث ایجاد پیوستگی بهتر بین میلگرد و بتن می‌شود و سبب بهبود عملکرد این دو مصالح در مجاورت هم می‌گردد [8]. از مزایای استفاده از این الیاف می‌توان به افزایش پیوستگی بهتر میلگرد و بتن، افزایش مقاومت کششی، افزایش مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای و کاهش گسترش ترک‌ها اشاره کرد. در طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ ساخت این الیاف به طور عمده آغاز شد. از چهل سال پیش به مرور زمان الیاف به عنوان مصالح افزودنی به بتن اضافه شدند [9].

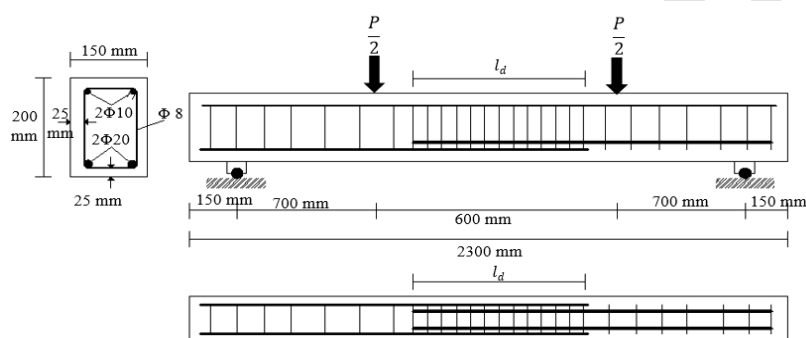
الیاف به طور کلی به دو دسته الیاف فولادی و الیاف مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شوند. الیاف مصنوعی شامل الیافی از جنس نایلون (Nylon)، پلی پروپیلن (Polypropylene)، پلی استر (Polyester) و پلی اتیلن

در این پژوهش، ۱۰ عدد نمونه تیر بتن مسلح با ارتفاع مقطع ۲۰۰، عرض مقطع ۱۵۰ و طول ۲۳۰۰ میلی متر و دارای درصد حجمی متفاوتی از الیاف فولادی ساخته شد و تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای استاتیکی و چرخه‌ای قرار گرفت. ۹ عدد از نمونه‌ها دارای وصله و یک نمونه به‌عنوان نمونه شاهد فاقد وصله بود. همچنین چهار عدد از نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و شش نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی در شکل (۳) و جدول (۲) ارائه شده‌است.

سانتی متر مطابق شکل (۲) استفاده شد. ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی و کرنش گسیختگی الیاف به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال، ۲،۰ گیگاپاسکال و ۳ درصد بود.



شکل ۲ الیاف فولادی مصرفی



شکل ۳ ابعاد هندسی نمونه‌ها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه و بارگذاری

جدول ۲ طول وصله، درصد الیاف فولادی و نحوه بارگذاری نمونه‌ها

بارگذاری استاتیکی		
نام نمونه	درصد الیاف فولادی (%)	طول وصله
W/o - St - 0%	۰	-
0.8l _d - St - 0%	۰	0.8l _d
0.8l _d - St - 1%	۱	0.8l _d
0.8l _d - St - 2%	۲	0.8l _d
بارگذاری چرخه‌ای		
0.8l _d - Cyc - 0%	۰	0.8l _d
0.8l _d - Cyc - 1%	۱	0.8l _d
0.8l _d - Cyc - 2%	۲	0.8l _d
l _d - Cyc - 0%	۰	l _d
l _d - Cyc - 1%	۱	l _d
l _d - Cyc - 2%	۲	l _d

نمونه‌های عمل‌آوری شده بعد از رسیدن به مقاومت ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار داده شدند. طرح اختلاط بتن ساده و الیافی مورد استفاده در این بررسی در جدول (۴)، ارائه شده‌است. در نمونه‌های دارای ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به ترتیب ۶ و ۱۱ کیلوگرم است. *بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه ۱۸ میلی‌متر است. برای حصول اطمینان از مقاومت نمونه‌های مورد نظر، از هر نمونه ۳ نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش فشار قرار داده شدند. متوسط مقاومت فشاری ۳ نمونه استوانه‌ای از هر نمونه اصلی، به‌عنوان مقاومت فشاری آن نمونه منظور شد. نتایج مربوط به متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۵)، ارائه شده‌است.

در جدول (۲)، l_d طول وصله محاسباتی است که توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود، $i\%$ درصد الیاف فولادی مصرفی، St و Cyc به ترتیب بیانگر بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای است. آرایش میلگردها در تمام نمونه‌ها یکسان بوده‌است و مساحت آرماتورهای فشاری و کششی در نمونه‌ها به ترتیب ۱۵۷ و ۶۲۸ میلی‌متر مربع است. فاصله آرماتورهای کششی و فشاری از دورترین تارهای فشاری مقطع، به ترتیب برابر با ۱۶۲ و ۲۵ میلی‌متر است و طول وصله کششی توسط رابطه (۳)، 430 میلی‌متر محاسبه شده‌است. این طول وصله کششی در نمونه‌هایی که طول وصله آنها برابر $0.8l_d$ کاهش داده شده، معادل 340 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. آرماتورهای مورد استفاده در نمونه‌ها تحت آزمایش کشش مستقیم بررسی شده و مشخصات آنها در جدول (۳) ارائه شده‌است.

جدول ۳ نتایج آرماتورهای کششی

قطر آرماتور (mm)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش تسلیم (%)	کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۸	۳۷۱	۵۶۰	۱۲,۹۴۶۵	۲۴,۹۱	۲۰۹,۲۸۷
۱۰	۴۰۸	۶۷۷	۱۳,۰۴۴۶	۲۵,۵۱	۲۱۰,۱۰۷
۲۰	۳۷۱	۵۶۱	۱۵,۲۷	۲۵,۸۲	۲۱۳,۱۷۸

جدول ۴ طرح اختلاط بتن

بتن معمولی					نوع بتن	
آب	فوق‌روان‌کننده	سیمان	ماسه	نخودی	مصالح	
۱۶۴	۲	۴۰۰	۹۵۰	*۸۲۰,۸	مقدار مورد نیاز در هر متر مکعب (kg)	
بتن الیافی						
آب	فوق‌روان‌کننده	سیمان	ماسه	نخودی	مصالح	
۱۶۴	۳	۴۰۰	۹۵۰	*۸۲۰,۸	مقدار مورد نیاز در هر متر مکعب (kg)	

جدول ۵ مقاومت فشاری بتن در نمونه‌ها

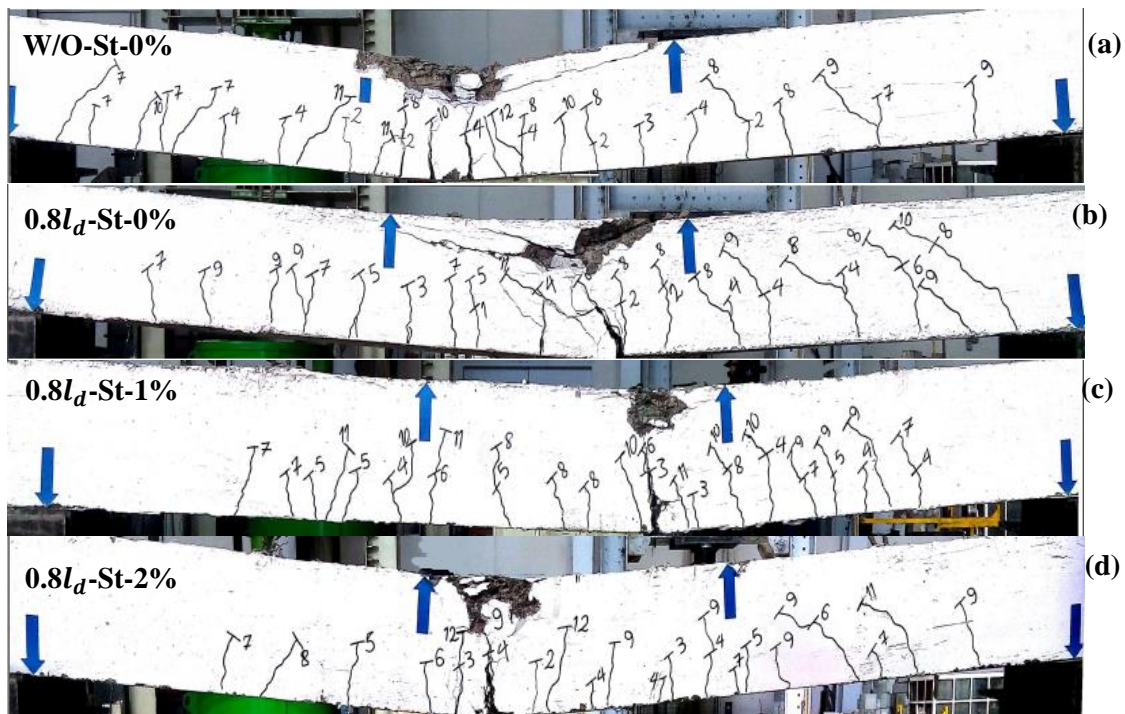
نام نمونه	متوسط مقاومت فشاری (MPa)
W/O-St-0%	۳۶,۰
l_d -Cyc-0%	۳۶,۰
l_d -Cyc-1%	۳۹,۰
l_d -Cyc-2%	۳۶,۰
$0.8l_d$ -St-0%	۳۷,۳
$0.8l_d$ -St-1%	۳۵,۷
$0.8l_d$ -St-2%	۳۵,۳
$0.8l_d$ -Cyc-1%	۳۵,۰
$0.8l_d$ -Cyc-2%	۳۵,۳
$0.8l_d$ -Cyc-0%	۳۷,۳



شکل ۴ خط‌کش مدرج اندازه‌گیری عرض ترک خوردگی

ترک‌ها افزایش یافت و امتداد ترک گسترش بیشتری پیدا کرد. با افزودن الیاف می‌توان با بهبود مقاومت پیوستگی، ظرفیت خمشی و بیشترین تغییر مکان عضو را بهبود داد. در این نمونه‌ها به کمک خط‌کش مدرج اندازه‌گیری عرض ترک خوردگی‌ها مطابق شکل (۴)، حداکثر عرض ترک خوردگی در لحظه نهایی اندازه‌گیری شد. افزون بر این تأثیر توأم ایجاد وصله آرماتور کششی و استفاده از الیاف بر ترک خوردگی‌ها و مسیر گسترش ترک‌ها مشخص شد که در شکل (۵) نشان داده شده است.

بارگذاری چهار نمونه $W/o - St - 0\%$ ، $0.8l_d - St - 0\%$ ، $0.8l_d - St - 1\%$ و $0.8l_d - St - 2\%$ ، بارگذاری به صورت استاتیکی انجام شد. نمونه اول به عنوان نمونه شاهد و فاقد وصله و الیاف بود. در ۳ نمونه دیگر طول وصله محاسباتی به مقدار ۲۰٪ کاهش داده شد تا اثر الیاف فولادی بر رفتار وصله مشخص شود. با کاهش طول وصله، درصدهای مختلف الیاف فولادی به نمونه‌ها افزوده شد. بار محاسباتی، بار کل جک بود. بارگذاری تا لحظه نهایی گسیختگی تیر افزایش داده شد. با افزایش بار و تغییر شکل تیر، عرض



شکل ۵ مسیر گسترش ترک خوردگی در نمونه‌ها تحت بار استاتیکی

فشاری مقطع امتداد پیدا کرد و تیر به صورت سریع و ناگهانی گسیخته شد.

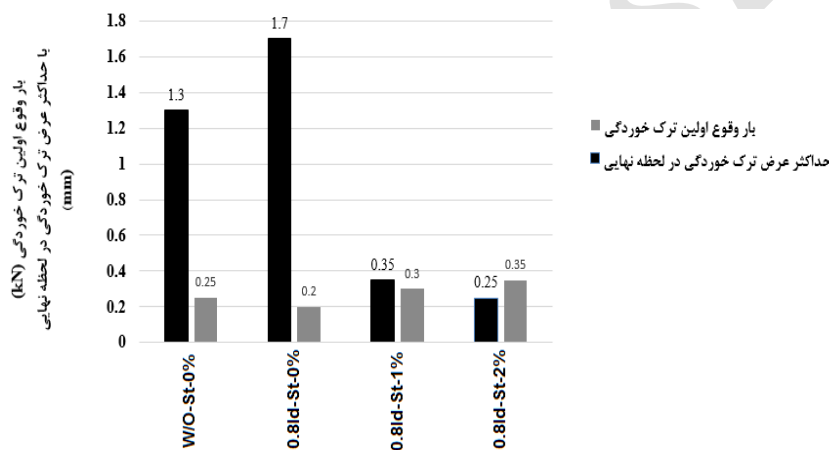
در این نمونه ترک‌های مورب افزایش یافت و گسترش آنها نسبت به نمونه شاهد بیشتر بود. در شکل (c-۵) و (d) $0.8l_d - St - 0\%$ و $0.8l_d - St - 0\%$ با افزودن الیاف فولادی به نمونه بتن مسلح، پیوستگی بین آرماتور و بتن افزایش یافت و آرماتورهای کششی کمتر در داخل نمونه لغزش کردند. از این رو با باز توزیع بهتر تنش، ضمن تمرکز ترک خوردگی در وسط دهانه، ترک‌های مورب کاهش یافتند و با افزایش بار امتداد ترک خوردگی‌ها گسترش کمتری پیدا کردند. در این دو حالت نیز ترک خوردگی از ناحیه حداکثر لنگر خمشی و در محل وصله آغاز شد. با اعمال بار بیشتر، ترک خوردگی مجدداً از دورترین تارهای کششی مقطع بروز کرد و با افزایش امتداد ترک‌های قبلی تیر گسیخته شد. مطابق شکل (۵-۲) d، با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی به مقدار ۲ درصد حجمی، ترک خوردگی کاهش بیشتری یافت و در لحظه نهایی ترک‌ها تا تار خنثای مقطع امتداد پیدا کردند.

مطابق شکل (۵-۲) a، در نمونه شاهد (W/O-St-) ۰٪، به دلیل یکپارچه بودن آرماتور و توزیع تنش در سراسر آرماتور کششی ترک خوردگی در تمام طول تیر اتفاق افتاد. در این نمونه با افزایش بار، ترک خوردگی‌ها در وسط دهانه و در ناحیه حداکثر لنگر خمشی آغاز شد. با افزایش بار توأم با گسترش امتداد ترک‌ها در وسط دهانه، ترک خوردگی به شکل مورب و از نزدیکی تکیه‌گاه آغاز شد. با افزایش مجدد بار اعمالی، با گسترش امتداد ترک خوردگی تا نزدیک تار خنثای مقطع و افزایش ترک خوردگی‌های مورب، نمونه گسیخته شد. در نمونه $0.8l_d - St - 0\%$ شکل (۵-۲) b، به دلیل ناکافی بودن طول وصله، مقاومت پیوستگی کاهش یافت و لغزش در آرماتورهای کششی بیشتر شد. با افزایش لغزش آرماتورهای کششی عرض ترک‌ها افزایش بیشتری پیدا کرد و تمرکز ترک خوردگی در وسط دهانه تیر و در ناحیه با بیشترین لنگر خمشی و وصله اتفاق افتاد. در این نمونه نسبت به نمونه شاهد (W/O-St-0%) با افزایش بار امتداد ترک‌ها افزایش بیشتری یافت و تا دورترین تارهای

در شکل (۶) حداکثر عرض ترک خوردگی و بار متناظر با اولین ترک خوردگی و در جدول (۶) مقایسه عرض ترک خمشی نشان داده شده است.

مطابق شکل (۶)، با افزودن الیاف فولادی باتوجه به اجرای وصله آرماتور کششی کاهش یافته ($0.8l_d$): عرض حداکثر ترک خوردگی در لحظه نهایی کاهش قابل ملاحظه ای یافت و بار وقوع متناظر با اولین ترک خوردگی افزایش یافت. بروز ترک خوردگی ها تحت بار استاتیکی تا لحظه نهایی افزایش یافت و با افزایش بار، عرض ترک خوردگی ها بیشتر شد. از این رو باتوجه به لغزش احتمالی آرماتورها و تأثیر افزودن الیاف فولادی بر کاهش لغزش آرماتور و افزایش تغییر شکل نمونه ها در شکل های (۷) تا کاهش یافت.

(۱۰)، نمودار بار- تغییر مکان نمونه ها تحت بارگذاری استاتیکی نشان داده شده است. باتوجه به شکل (۸)، در نمونه با وصله آرماتور کششی، پس از بار نهایی کاهش سریع ظرفیت خمشی اتفاق می افتاد. از این رو لغزش آرماتور زیاد بود و مطابق شکل (۵-b)، امتداد ترک ها افزایش بیشتری یافت. باتوجه به شکل های (۹ و ۱۰)، با افزودن الیاف فولادی، لغزش آرماتور کاهش یافت و ضمن حفظ ظرفیت خمشی نهایی، تغییر شکل افزایش یافت. از این رو، طبق شکل های (۵-c و d)، با کاهش لغزش آرماتور ترک خوردگی ها

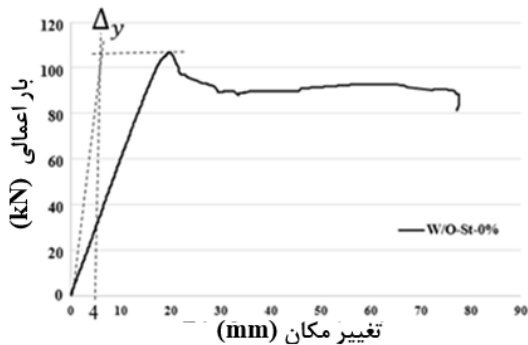


شکل ۶ حداکثر عرض ترک خوردگی نمونه ها در لحظه نهایی تحت بار استاتیکی

جدول ۶ مقایسه عرض ترک خمشی

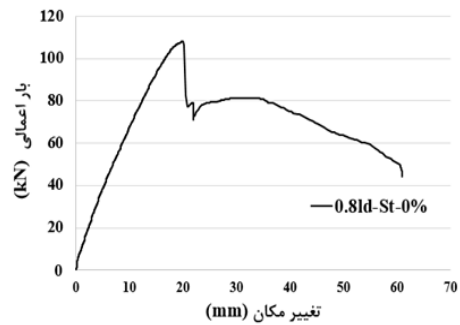
نمونه	حداکثر عرض ترک خمشی (mm)
W/o - St - 0%	۱,۳۰
0.8l _d - St - 0%	۱,۷۰
0.8l _d - St - 1%	۰,۳۵
0.8l _d - St - 2%	۰,۲۵
مقدار مجاز ACI [۳]	۰,۴۰
گرگلی-لوتز [۴]	۰,۱۲
برومز-لوتز [۵]	۰,۱۳

در بررسی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای، ۶ نمونه $0.8l_d$ - l_d -Cyc-2%، l_d -Cyc-1%، l_d -Cyc-0% و $0.8l_d$ -Cyc-1%، $0.8l_d$ -Cyc-0% دارای وصله می‌باشند. در ۳ نمونه اول، طول وصله همان طول وصله محاسباتی و در ۳ نمونه دیگر طول وصله به مقدار ۲۰ درصد کاهش داده شده است. بار اعمالی چرخه‌ای از نوع کنترل تغییر مکان است. برای اعمال این بار در ابتدا باید یک تغییر مکان هدف تعیین شود. تغییر مکان هدف (Δ_y) به صورت تغییر مکان به دست آمده از تلاقی دو خط مماس بر نقطه معادل با حداکثر ظرفیت بار اعمالی و مماس اولیه در نمودار بار- تغییر مکان نمونه شاهد مطابق شکل (۱۱)، تعریف می‌شود [13].

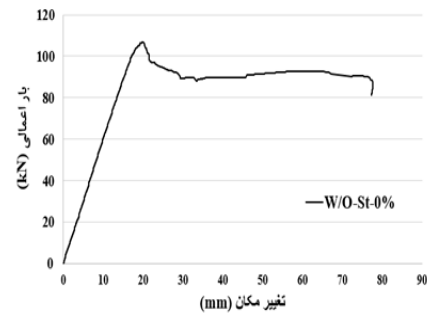


شکل ۱۱ تعیین تغییر مکان هدف (Δ_y)

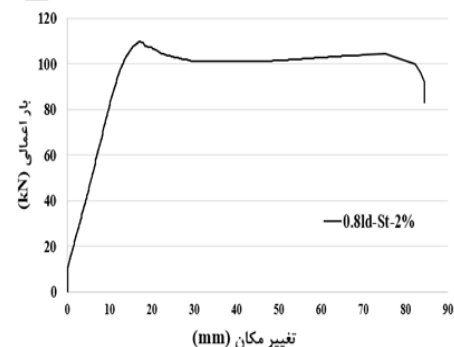
پس از تعیین تغییر مکان هدف، در چرخه اول به اندازه Δ_y چرخه دوم به اندازه $2\Delta_y$ ، چرخه سوم به اندازه $3\Delta_y$ تغییر مکان به تیر داده می‌شود و همین فرایند تا شکست نهایی تیر انجام می‌شود. در نتیجه در چرخه اول، بار تا تغییر مکان معادل ۴ میلی متر افزایش داده شد و زمانی که تیر به این تغییر مکان رسید، بار تا مقدار صفر برگشت داده شد. در اینجا چرخه اول طی شد. بعد از صفر شدن بار، مجدداً بار تا تغییر مکان ۸ میلی متر افزایش داده شد. بعد از رسیدن حداکثر جابه‌جایی میانه تیر به این مقدار، بار اعمالی تا مقدار صفر کاهش داده شد. تأثیر ایجاد وصله و استفاده از الیاف بر ترک‌خوردگی‌ها و مسیر گسترش ترک‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



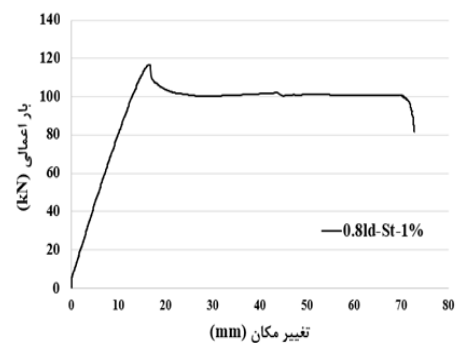
شکل ۷ منحنی بار- تغییر مکان نمونه W/O-St-0%



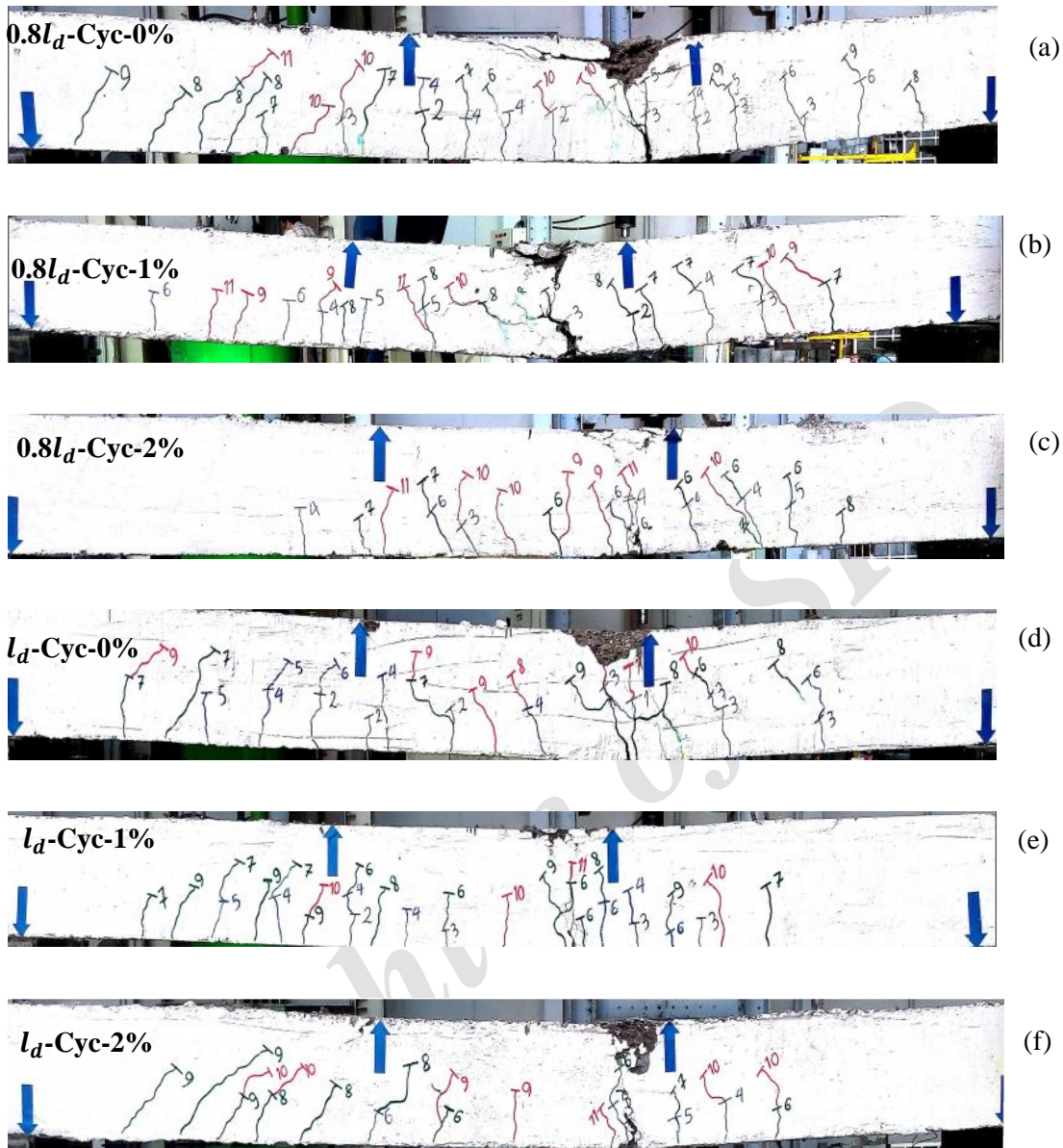
شکل ۸ منحنی بار- تغییر مکان نمونه $0.8l_d - St - 0\%$



شکل ۹ منحنی بار- تغییر مکان نمونه $0.8l_d - St - 1\%$



شکل ۱۰ منحنی بار- تغییر مکان نمونه $0.8l_d - St - 2\%$



شکل ۱۲ مسیر گسترش ترک خوردگی تحت بارگذاری چرخه‌ای

شدن امتداد ترک به دورترین تارهای فشاری مقطع، عضو سریع گسیخته شد. در این نمونه بیشتر تمرکز ترک-خوردگی‌ها در محل وصله بود ولی بعد از وقوع ترک‌های قائم در میانه دهانه در لحظه نهایی ترک‌های مایل از نزدیک تکیه‌گاه‌ها نیز ایجاد شد. با توجه به شکل (۱۲-b) و (c)، در نمونه‌های $0.8l_d - Cyc - 1\%$ و $0.8l_d -$

مطابق شکل (۱۲-a)، ایجاد وصله آرماتور کششی کاهش یافته ($0.8l_d - Cyc - 0\%$)، به دلیل عدم تأمین مقاومت پیوستگی به اندازه کافی، لغزش در آرماتورها اتفاق افتاد و ترک خوردگی در سراسر دهانه تیر رخ داد. با افزایش بار اعمالی ضمن گسترش امتداد ترک-خوردگی‌ها، عرض ترک‌ها افزایش یافت و با نزدیک

وصله آرماتور کششی (l_d)، لغزش بین آرماتور و بتن نسبت به حالت وصله کاهش یافته ($0.8l_d$)، کمتر بود و همین امر نیز به خودی خود باعث کاهش عرض ترک- خوردگی ها شد که با افزودن الیاف فولادی نیز بهبود بیشتری پیدا کرد. از این رو ایجاد وصله آرماتور کششی سبب تمرکز تنش می گردد و باعث می شود که ترک- خوردگی ها بیشتر در محل وصله اتفاق بیفتد. با افزودن الیاف فولادی می توان ضعف ایجاد شده به دلیل اجرای وصله آرماتور کششی را تا حدودی جبران کرد.

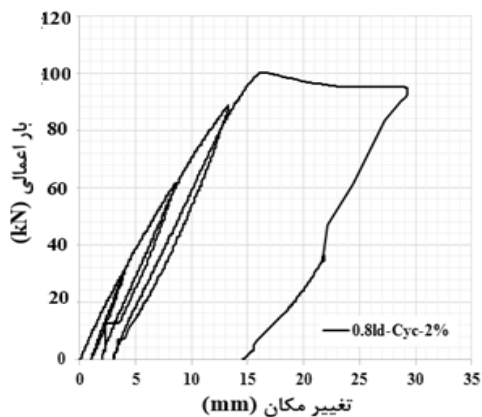
در بررسی عرض ترک خوردگی تحت بارگذاری چرخه ای، عرض ترک ها در هر چرخه در دو لحظه انتهایی بارگذاری و انتهایی باربرداری به کمک خط کش مدرج اندازه گیری شده است. مقادیر ترک خوردگی اندازه- گیری شده در جدول (۷) ارائه شده است.

$Cyc - 2\%$ با افزودن الیاف فولادی به دلیل افزایش پیوستگی بین آرماتورهای کششی و بتن، لغزش بین آرماتورهای کششی و بتن کاهش یافت و ترک خوردگی- ها بیشتر در وسط دهانه تیر و در محل حداکثر لنگر خمشی و وصله آرماتور کششی اتفاق افتاد. افزون بر این با افزودن الیاف فولادی بر عضو بتن مسلح، امتداد ترک ها و عرض ترک خوردگی ها کاهش یافت و ترک های جدید تحت بارگذاری بیشتر از دورترین تارهای کششی مقطع آغاز شد که همین امر سبب کاهش عرض ترک خوردگی پیشین و باز توزیع بهتر تنش در طول عضو شد. با توجه به شکل (۱۲- f تا d) نتایج به دست آمده از گسترش ترک- خوردگی ها در نمونه های دارای وصله کاهش داده نشده ($0.8l_d - Cyc - 0\%$ و $0.8l_d - Cyc - 0\%$) مطابق با نمونه های دارای وصله کاهش یافته (شکل ۱۲- a تا c) افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت پیوستگی، کاهش لغزش آرماتور و بتن و در نهایت کاهش عرض ترک- خوردگی ها شد. در این نمونه ها به دلیل کافی بودن طول

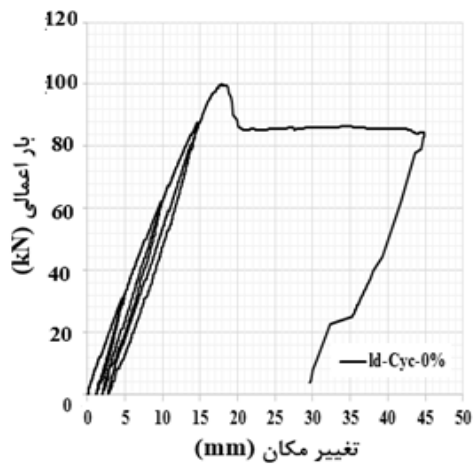
جدول ۷ ترک خوردگی نمونه ها تحت بارگذاری چرخه ای

بار وقوع اولین ترک خوردگی (ton)	عرض ترک خوردگی (mm)								نمونه
	چرخه چهارم		چرخه سوم		چرخه دوم		چرخه اول		
	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	انتهای باربرداری	انتهای بارگذاری	
۱,۰۰	۲,۱۰	۴,۰۰	۰,۹۰	۲,۱۰	۰,۲۰	۰,۴۵	۰,۰۵	۰,۲۰	$0.8l_d - Cyc - 0\%$
۲,۰۰	۰,۵۰	۱,۲۰	۰,۲۵	۰,۶۰	۰,۱۵	۰,۲۵	۰,۰۰	۰,۱۰	$0.8l_d - Cyc - 1\%$
۳,۰۰	۰,۴۰	۰,۶۵	۰,۲۰	۰,۳۰	۰,۰۵	۰,۱۵	۰,۰۰	۰,۰۵	$0.8l_d - Cyc - 2\%$
۱,۵۰	۱,۹۰	۳,۰۰	۰,۷۰	۱,۸۰	۰,۱۰	۰,۳۵	۰,۰۰	۰,۰۵	$l_d - Cyc - 0\%$
۲,۰۰	۰,۳۵	۰,۷۰	۰,۲۰	۰,۵۵	۰,۱۰	۰,۲۰	۰,۰۰	۰,۰۱	$l_d - Cyc - 1\%$
۴,۰۰	۰,۳۰	۰,۵۰	۰,۱۵	۰,۲۵	۰,۰۰	۰,۱۰	۰,۰۰	۰,۰۰	$l_d - Cyc - 2\%$

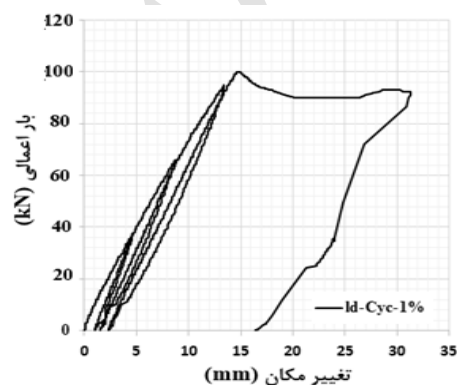
تحت بارگذاری چرخه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۱۵ منحنی بار- تغییر مکان نمونه
 $0.8I_d - Cyc - 2\%$

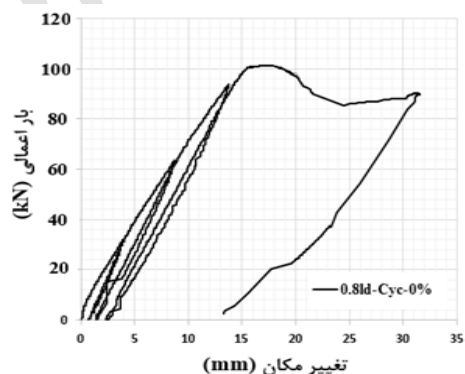


شکل ۱۶ منحنی بار- تغییر مکان نمونه
 $I_d - Cyc - 0\%$ تحت بارگذاری چرخه‌ای

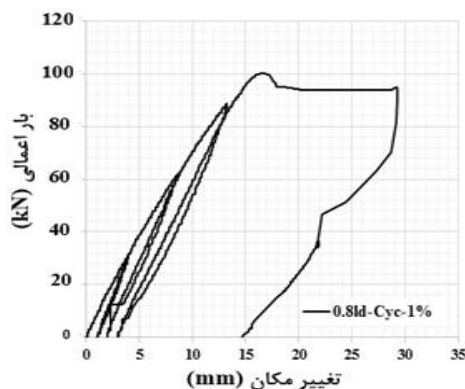


شکل ۱۷- منحنی بار- تغییر مکان نمونه $I_d - Cyc - 1\%$

مطابق جدول (۷)، در هر چرخه و همچنین در کل چرخه ها، با افزودن الیاف فولادی پیوستگی بین آرماتور کششی و بتن افزایش یافت، عرض ترک‌ها کاهش یافت و بار معادل اولین ترک‌خوردگی افزایش یافت. در نمونه $I_d - Cyc - 2\%$ ترک‌خوردگی از چرخه دوم آغاز شد و در چرخه اول هیچ ترک‌خوردگی رخ نداد. در هر چرخه، به هنگام بارگذاری عرض ترک‌ها باز شد و با باربرداری عرض ترک‌خوردگی بسته شد. باز و بسته شدن عرض ترک‌های بتن مسلح می‌شود. هرچه باز و بسته شدن ترک‌ها سخت‌تر باشد و شکل‌پذیری نمونه بیشتر باشد اتلاف انرژی نیز بیشتر خواهد بود. از این رو باتوجه به کاهش لغزش آرماتور و افزایش تغییر شکل نمونه‌ها در شکل‌های (۱۳ تا ۱۸)، نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی نشان داده شده است.



شکل ۱۳ منحنی بار- تغییر مکان نمونه $0.8I_d - Cyc - 0\%$



شکل ۱۴ منحنی بار- تغییر مکان نمونه $0.8I_d - Cyc - 1\%$

فولادی، با اعمال نیروی فشاری، هسته نمونه بتنی و پوسته آن به ترتیب گسیخته شد و نمونه استوانه‌ای گسیخته گردید. با افزودن الیاف فولادی به میزان ۱ و ۲ درصد حجمی نمونه بتنی، هسته نمونه تقویت شد و گسیختگی نمونه و تخریب پوسته بتن سخت‌تر گردید. مطابق شکل (۱۹-ج) افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونه بتن غیر مسلح، ترک‌هایی در پوسته نمونه ایجاد شد ولی نمونه از هم فروپاشید.



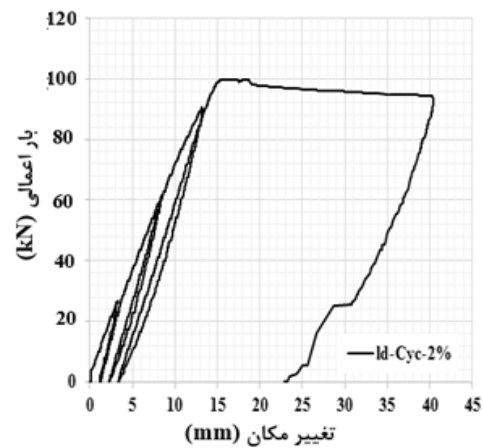
(ب) (الف)



(ج)

شکل ۱۹ گسیختگی نمونه فشاری: (الف) فاقد الیاف فولادی، (ب) دارای ۱ درصد حجمی الیاف فولادی، (ج) دارای ۲ درصد حجمی الیاف فولادی

به منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن، از هر نمونه اصلی به تعداد ۳ نمونه، برای تعیین منحنی تنش- کرنش تهیه شد. در این نمونه‌ها با قراردادن کرنش‌سنج بر روی نمونه ضمن ثبت تنش، کرنش‌ها نیز ثبت شد. با ثبت تنش و کرنش، منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های فاقد الیاف، ۱ درصد و ۲ درصد حجمی ترسیم شد. متوسط منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها محاسبه و مطابق شکل‌های (۲۰ تا ۲۲) ترسیم شد.



شکل ۱۸ منحنی بار- تغییر مکان نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای

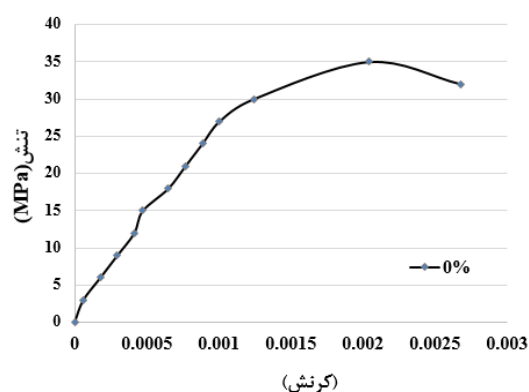
باتوجه به شکل‌های (۱۳ تا ۱۵) و شکل‌های (۱۶ تا ۱۸) با افزودن الیاف فولادی به نمونه، می‌توان طول وصله آرماتور کششی را کاهش داد بدون آنکه شکل- پذیری کاهش یابد. همین امر نشان‌دهنده کاهش لغزش آرماتور دارای وصله است. از این رو با کاهش لغزش آرماتور در بتن مطابق شکل‌های (۱۲- a تا f)، با افزودن الیاف فولادی و کاهش لغزش آرماتور، گسترش مسیر ترک‌خوردگی‌ها کاهش یافته است.

به منظور بررسی تأثیر مقاومت کششی و فشاری بتن بر رفتار تیر بتن مسلح، ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک، به‌ازای هر نمونه تیر اصلی، ۶ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه شده است. ۳ نمونه تحت آزمایش فشار قرار گرفت و ضمن بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و نحوه ترک‌خوردگی و گسیختگی نمونه، به تعیین منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها پرداخته شد. ۳ نمونه دیگر نیز تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (آزمایش برزیلی) قرار داده شد و ضمن تعیین حداکثر تنش کششی مجاز به نحوه ترک‌خوردگی و گسیختگی نمونه‌ها پرداخته شد. در بررسی تأثیر این الیاف بر نحوه ترک‌خوردگی نمونه فشاری، نتایج گسیختگی در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

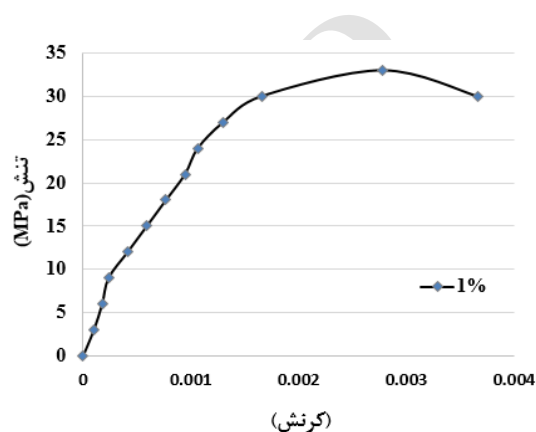
مطابق شکل (۱۹-الف)، در نمونه فاقد الیاف

۱ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونه بتن مطابق شکل (۲۱)، مقداری شکل پذیری نمونه افزایش پیدا کرد ولی حداکثر ظرفیت فشاری نمونه تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرد. در این حالت با افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن، کرنش معادل بیشترین تنش $0,00281$ و بیشترین تنش 34 مگاپاسکال بود. با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونه استوانه‌ای، تغییر شکل افزایش زیادی داشت و سخت‌شوندگی در منحنی تنش-کرنش ایجاد شد. از طرفی افزودن الیاف فولادی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حداکثر ظرفیت فشاری نمونه بتنی نداشت. در این حالت با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن کرنش معادل بیشترین تنش $0,0054$ و بیشترین تنش 35 مگاپاسکال بود. علت بروز ناحیه سخت‌شوندگی در نمونه بتن غیر مسلح را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در نمونه‌های بتنی با افزایش فشار ابتدا پوسته بیرونی دچار ترک خوردگی می‌شود و سپس با اعمال بار بیشتر هسته نمونه دچار ترک خوردگی و گسیختگی می‌شود. بروز ترک خوردگی از ناحیه بالا و پایین نمونه استوانه‌ای آغاز می‌شود و سپس به میانه نمونه انتقال پیدا می‌کند. سپس با ایجاد انبساط جانبی و بروز کشش در میانه نمونه فشاری، نمونه گسیخته می‌شود و فرومی‌پاشد. افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود. هنگامی که نمونه از وسط دچار انبساط جانبی و کشش می‌گردد الیاف با افزایش ظرفیت کششی مانع از گسیخته شدن نمونه می‌شوند و ناحیه سخت‌شوندگی در منحنی تنش-کرنش ایجاد می‌شود.

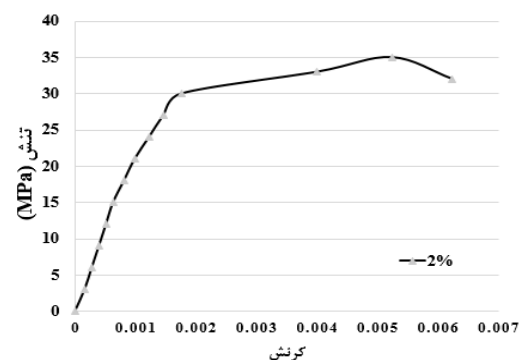
در بررسی تأثیر الیاف فولادی بر ترک خوردگی نمونه تحت کشش غیرمستقیم، ۳ عدد نمونه استوانه‌ای برای انجام آزمایش مقاومت کششی تهیه شد و تحت کشش غیر مستقیم قرار گرفت. در بررسی ترک خوردگی و گسیختگی نمونه استوانه‌ای تحت کشش غیرمستقیم، تأثیر الیاف فولادی در شکل (۲۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۰ منحنی تنش-کرنش بتن معمولی



شکل ۲۱ منحنی تنش-کرنش بتن الیافی دارای ۱ درصد حجمی الیاف فولادی



شکل ۲۲ منحنی تنش-کرنش بتن الیافی دارای ۲ درصد حجمی الیاف فولادی

مطابق شکل‌های (۲۰ تا ۲۲)، افزودن الیاف فولادی در ابتدای بارگذاری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر منحنی تنش-کرنش نداشت و رفتار نمونه‌ها تقریباً یکسان بود. در نمونه بتن معمولی کرنش معادل بیشترین تنش بتن $0,00226$ و بیشترین تنش 35 مگاپاسکال است. با افزودن



شکل ۲۳ گسیختگی کششی نمونه‌های استوانه‌ای تحت کشش غیرمستقیم

جدول ۸ نتایج بررسی‌های کشش غیرمستقیم

نمونه	حداکثر نیروی اعمالی (kN)	متوسط نیروی اعمالی (kN)	متوسط تنش کشش (MPa)
W/O-St-0%	۲۱۰,۶۰	۲۰۰,۴۰	۲۱۵,۸۰
I_d -Cyc-0%	۱۹۷,۲۰	۲۰۵,۴۰	۱۸۰,۴۰
I_d -cyc-1%	۳۶۲,۳۰	۳۷۳,۸۰	۴۲۳,۲۰
I_d -cyc-2%	۴۶۰,۶۰	۴۷۲,۵۰	۴۷۰,۳۰
0.8 I_d -St-0%	۲۷۱,۳۰	۲۸۰,۷۰	۲۵۰,۴۰
0.8 I_d -St-1%	۳۵۲,۱۰	۳۵۴,۱۰	۳۵۴,۸۰
0.8 I_d -St-2%	۳۶۲,۰۰	۳۶۷,۹۰	۳۳۴,۰
0.8 I_d -Cyc-1%	۳۰۶,۸۰	۳۱۲,۷۰	۳۰۹,۹۰
0.8 I_d -Cyc-2%	۳۲۴,۸۰	۳۷۱,۸۰	۳۱۲,۷۰
0.8 I_d -Cyc-0%	۱۶۴,۸۰	۲۳۰,۵۰	۲۷۷,۶۰

مطابق شکل (۲۳-الف)، کشش غیرمستقیم در نمونه فاقد الیاف فولادی سبب گسیختگی نمونه و تقسیم نمونه به دو قسمت مجزا می‌شود. با افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونه بتنی تحت کشش غیرمستقیم، لهیدگی و تغییر شکل ایجاد می‌گردد ولی نمونه به دو نیم تقسیم نمی‌شود. مطابق شکل (۲۳-ج) افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی باعث می‌شود تا مقاومت بتن افزایش یابد و لهیدگی در بتن کمتر شود و تنها ترک‌های مویین در پوسته بیرونی نمونه رخ دهد. افزودن الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود ولی با بیشتر کردن درصد الیاف فولادی این افزایش مقاومت با شیب کمتری افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از گسیختگی نمونه‌های بتنی تحت کشش

غیرمستقیم در جدول (۸) ارائه شده‌است. مطابق جدول (۸)، افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود. با افزایش درصد الیاف فولادی این مقاومت بیشتر می‌شود. علاوه بر افزایش مقاومت فشاری، افزودن الیاف فولادی مانع از گسیختگی کامل نمونه استوانه‌ای می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر الیاف فولادی بر ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک در عضو بتن مسلح دارای وصله آرماتور کششی تحت بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق شامل ۱۰ نمونه تیر بتن مسلح بود. عرض ترک‌خوردگی‌ها، مسیر گسترش ترک

- و تأثیر افزودن الیاف فولادی بر ترک خوردگی و گسیختگی بتن مسلح نشده مورد بررسی قرار گرفت. براساس اطلاعات به دست آمده از انجام این آزمایش‌ها، نتایج زیر به دست آمده است:
- ۱) افزودن الیاف فولادی سبب کاهش لغزش آرماتورهای کششی در محل وصله می‌شود و عرض ترک خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد. با افزودن الیاف فولادی به میزان ۱ و ۲ درصد حجمی در نمونه دارای وصله کاهش یافته ($0.8l_d$) می‌توان به ترتیب حداقل به میزان ۷۳ و ۸۰ درصد عرض ترک خوردگی را کاهش داد.
 - ۲) افزودن الیاف فولادی به دلیل افزایش مقاومت پیوستگی باعث کاهش توزیع ترک در سراسر عضو می‌گردد و باعث تمرکز ترک خوردگی‌ها در میانه دهانه تیر و در محل وصله می‌شود.
 - ۳) در بارگذاری چرخه‌ای افزودن الیاف فولادی سبب افزایش بار وقوع اولین ترک خوردگی می‌شود و حتی باعث می‌شود که در چرخه‌های ابتدایی ترک خوردگی اتفاق نیافتد. در نمونه $l_d - C_{yc} - 2\%$ افزودن الیاف فولادی به مقدار ۲ درصد حجمی باعث می‌شود تا ترک خوردگی از چرخه دوم آغاز شود.
 - ۴) افزودن الیاف فولادی سبب افزایش بار معادل وقوع اولین ترک خوردگی می‌شود.
- ۵) در سازه‌های بتن مسلح باز و بسته شدن عرض ترک-ها سبب استهلاک انرژی می‌شود. افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های تحت بارگذاری چرخه‌ای، سبب افزایش استهلاک انرژی عضو بتن مسلح می‌شود. اضافه کردن ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف فولادی به نمونه با طول وصله l_d و $0.8l_d$ به ترتیب سبب افزایش استهلاک انرژی به مقدار ۴، ۶، ۳۴ و ۳۶ درصد می‌گردد.
- ۶) افزودن الیاف فولادی به نمونه بتنی غیرمسلح تحت فشار، باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود ولی در افزایش مقاومت فشاری تأثیر چشم‌گیری ندارد. افزون‌براین افزودن الیاف فولادی با تقویت هسته نمونه استوانه‌ای مانع از فروپاشی نمونه بتنی می‌شود.
- ۷) اضافه کردن الیاف فولادی به نمونه بتن غیرمسلح تحت کشش غیرمستقیم مانع از فروپاشی و جداشدگی در نمونه می‌شود. افزون‌براین افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود.
- ۸) با افزودن الیاف فولادی، در صورت داشتن وصله آرماتور کششی بیشینه ظرفیت خمشی نمونه کاهش محسوس پیدا نمی‌کند و افزودن الیاف ضمن افزایش پیوستگی آرماتور وصله و بتن، باعث افزایش تغییرشکل نهایی نمونه و کاهش لغزش آرماتور می‌شود.

مراجع

1. Dai. L., Wang. L., Zhang. J and Zhang. X., "A Global Model for Corrosion-induced Cracking in Prestressed Concrete Structures", *engineering failure analysis*, January 23, (2016).
2. Carmo. R. N. D., Valenca. J., Silva. D and Dias-da-Costa. D., "Assessing Steel Strains on Reinforced Concrete Members from Surface Cracking Pattern" و *Construction and building materials*. pp. 265-275. 9 August, (2015).
3. ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structure, (2001).
4. Gergely. P., and Lutz. L. A., "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members, Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete", SP-20, *American Concrete Institute*, Detroit, pp. 87-

- 117, (1968).
5. Brooms, B., Lutz, L. A. and Leroy, A., "Effects of Arrangement of Reinforcement on Crack Width and Spacing of Reinforced Concrete Members", *ACI JOURNAL*, Proceedings V. 62, No. 11, Nov. pp. 1395-1410, (1965).
 6. Zomorodian, M., Yang, G., Belarbi, A. and Ayoub, A., "Cracking Behavior and Crack Width Prediction of FRP Strengthened Rc Members under Tension", *Engineering structures*. 313-324. 27 June (2016).
 7. Ji, Y., Hu, Y., Zhang, L. and Bao, Z., "Laboratory Studies on Influence of Transvers Cracking on Chloride-induced Corrosion Rate in Concrete", *Cement & concrete Composites*. S0958-9465(15)30062-7. 26 December, (2015).
 8. Lagier, F., Massicotte, B., and Charron, J. P., "Bond Strength of Tension Lap Splice Specimens in UHPFRC", *Construction and Building Materials*, 26 May, (2015).
 9. Shah, P. S., "Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement Based Material", *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov., (1991).
 10. ACI 544.1R-02, State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete, (2002).
 11. Yoo, D. y., Yoon, Y. S and Banthia, N., "Flexural Response of Steel-fiber-reinforced Beams: Effects of Strength, Fiber Content and Strain-rate", *Cement & concrete Composites*, 25 February, (2015).
 12. Esfahani, M. R. and Kianoush, M. R., "Development/Splice Length of Reinforcing Bars", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, January–February, (2005).
 13. Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E., and Gosh, S.K. "Behavior of Lapsplined Reinforcing Bars Embedded in High Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, pp. 826–836, doi:10.14359/737. (1999).