

# بررسی تاثیر الیاف فولادی بر گسترش ترک در تیرهای بتن مسلح بازیافتی دارای وصله میلگرد

مازیار فرخ پور تبریزی<sup>۱</sup>، منصور قلعه نوی<sup>۲\*</sup>، آرش کریمی پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاداسلامی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه تگزاس ال پاسو، ال پاسو، آمریکا

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- Farokhpour.M@yahoo.com

۲- Ghalehnovi@um.ac.ir

۳- Karimipour.Arash@um.ac.ir

## چکیده:

در این پژوهش، تاثیر افزودن درصد حجمی ۰ و ۲ درصد از الیاف فولادی دو سر خم شده در تیرهای دارای سه طول وصله به اندازه ۴۳ سانتی‌متر، ۳۴ سانتی‌متر و ۲۶ سانتی‌متر و سنگدانه بازیافتی ۰ و ۱۰۰ درصد بر ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام این بررسی، کاهش حداقل عرض ترک‌خوردگی به ازای افزودن الیاف فولادی در تیر بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی دارای وصله میلگرد کششی است. از آنجایی که ایجاد وصله میلگرد بدلیل افزایش میزان لغزش آرماتور در تیرهای بتنی باعث افزایش عرض ترک‌خوردگی می‌شود، در این بررسی سعی شده است تا با افزودن الیاف فولادی دو سر خم شده این ضعف در افزایش عرض ترک‌خوردگی در تیرهای بتن مسلح کاهش داده شود. به منظور انجام بررسی، دوازده نمونه تیر آزمایشگاهی به عرض مقطع ۱۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر با درصدهای متفاوت از الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی ساخته شد. نمونه‌ها تحت خمش چهارنقطه‌ای مورد ارزیابی قرار داده شد. در آزمایش‌ها، منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها، مسیر گسترش ترک‌خوردگی و تاثیر افزودن الیاف فولادی بر ترک‌خوردگی نمونه‌ها تحت فشار و کشش غیر مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان داد با افزودن الیاف فولادی در تیرهای ساخته شده از سنگدانه بازیافتی به مقدار ۲ درصد حجمی، می‌توان طول وصله میلگردها را به میزان ۴۰ درصد کاهش داد.

## واژگان کلیدی:

الیاف فولادی، بتن الیافی، بارگذاری استاتیکی، ترک‌خوردگی، وصله میلگردهای کششی، سنگدانه بازیافتی.

---

\* منصور قلعه نوی، دانشیار گروه مهندسی عمران-دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد.

ایمیل: [Ghalehnovi@um.ac.ir](mailto:Ghalehnovi@um.ac.ir) (منصور قلعه نوی)

# Investigation of the effect of steel fibers on failure extension of recycled aggregate concrete beams with lap-spliced bars

Mazyar Farrokhpour<sup>1</sup>, Mansour Ghalehnovi<sup>2</sup>, Arash Karimipour<sup>3</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

## Abstract:

In this research, the effect of adding 0% and 2% volumetric percent of steel fibers in beams containing three patches of length, 43 cm, 34 cm and 26 cm, and recycled aggregate 0 and 100% on the cracking and expansion path. The cracks were examined under static loading. The purpose of this study is to reduce the minimum crack width for adding steel fibers to reinforced concrete beams made of recycled aggregates and tensile reinforcement patches. Hence, twelve specimens of the beam were made at 150, 200, 1500 mm length with a length of different tensile adherence and different percentages of steel and recycled aggregates. The experiments were performed as a quadrilateral bend. In experiments, the load-displacement curve in the middle of the span of the specimens, the trajectory expansion along the beam and at the maximum flexural anchor, the width of cracking, and the effect of adding steel fibers on the compression and elongation of the specimens indirectly investigated. In addition, the results were compared with those presented in the ACI, CSA, NS, CEB FIP and EuroCode2 regulations. The results of the experiments showed that the addition of steel fibers reduced the slip of the tensile reinforcement in the patched area and reduced the crack-cracking width. Also, by adding steel fibers in beams made of 2% recycled aggregate, the patch length can be reduced by 40%.

**Keywords:** fibers concrete, static loading, failure crack, lap-spliced bars, recycled aggregate.

## ۱ - مقدمه و تاریخچه تحقیقات

علل برخی خرابی‌ها در تیرها و ستون‌ها، خوردگی میلگردها و کاهش سریع مقاومت خمشی است. ضعف بتن در مقابل کشش سبب ترک خوردگی نمونه بتن مسلح شده و امکان نفوذ مواد شیمیایی در اعضای بتنی را افزایش می‌دهد. این امر می‌تواند سبب زنگ‌زدگی و خوردگی میلگردها شود. از طرف دیگر، برای اتصال اعضای بتنی در بخش‌هایی از سازه نیاز به استفاده از وصله میلگرد است. آنچه در وصله میلگرد حائز اهمیت است، تامین طول مناسب آنها تا قبل از اینکه میلگردها از هم جدا شده و یا از داخل عضو بیرون بیایند. طول مناسب وصله زمانی تامین می‌شود که میلگرد توانایی انتقال تنش را در طول وصله داشته تا در حد نهایی امکان تسلیم میلگرد پیش از خروج از عضو فراهم گردد. ناکافی بودن طول وصله میلگرد، افزون بر کاهش ظرفیت خمشی تیرها سبب افزایش عرض ترک خوردگی و گسترش ترک نیز می‌شود. روابط مختلفی برای تعیین طول وصله میلگرد در آیین‌نامه‌ها و توسط محققین ارائه شده است. در این بررسی، طول وصله نمونه‌های آزمایشگاهی طبق رابطه پیشنهادی اصفهانی و کیانوش [۱] که از تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های مختلف گذشته برخوردار است، توسط رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$l_d = \frac{T}{a\sqrt{f_c'}} = \frac{A_s f_s}{a\sqrt{f_c'}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $A_s$  و  $f_s$  به ترتیب مساحت میلگردهای طولی و تنش کششی میلگرد است. زمانی که میلگرد به تسلیم برسد، در رابطه (۱) از  $f_y$  بجای  $f_s$  استفاده می‌شود و  $a = \frac{\frac{c}{d_b} + 0.5}{\frac{c}{d_b} + 3.6} \times 2d_b$ . زمانی رابطه (۱) قابل قبول است که مقدار کافی خاموت در طول وصله تعبیه شود. برای جزئیات بیشتر به مرجع [۱] مراجعه شود. از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد مناسب وصله در تیرهای بتن مسلح، پیوستگی بین میلگرد و بتن است. استفاده از الیاف فولادی سبب افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن می‌شود. الیاف به طور کلی به دو دسته الیاف فولادی و الیاف مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شوند. الیاف مصنوعی شامل الیافی از جنس نایلون، پلی‌پروپیلن، پلی‌استر و پلی‌اتیلن هستند. این الیاف بسته به نوع کاربردشان دارای شکل و اندازه‌های مختلفی می‌باشند [۲]. استفاده از الیاف فولادی باعث

کاهش عرض ترک خوردگی و باز توزیع بهتر تنش می‌شود. همین امر سبب بهبود مقاومت پیوستگی میلگردها می‌شود. 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 فولادی سبب افزایش مقاومت خمشی و ضربه‌ای می‌شود. با افزایش درصد الیاف می‌توان مقاومت عضو بتن مسلح را بهبود بیشتری داد [۳]. افزون بر افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن، الیاف فولادی نه تنها باعث کاهش عرض ترک خوردگی می‌شوند، بلکه سبب کاهش عرض ترک می‌شود [۴، ۵]. در حالت بتن سفت شده، الیاف فولادی مانند پلی بین ترک‌های کوچک عمل کرده و مانع از باز شدن آنها می‌شود. افزون بر این، در صورتی که الیاف فولادی به میزان بالای ۱٪ حجمی در بتن استفاده شود، تاثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت کششی بتن دارد [۶]. زمانی که بار وارد شده به بتن به میزان مقاومت کششی آن می‌رسد، ترک‌های ریز شروع به گسترش و باز شدن می‌کنند. از این رو، الیاف فولادی مانع از تغییر ترک‌های ریز به ترک‌های درشت می‌شوند و همین امر باز شدن عرض ترک‌ها را به تاخیر می‌اندازد. از طرف دیگر، در صورتیکه الیاف فولادی به میزان کم در عضو بتنی استفاده شود، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت کششی و خمشی عضو بتنی نخواهد داشت. از این رو، در صورتی که الیاف فولادی به میزان مناسبی در عضو بتنی استفاده شود، بدلیل افزایش مقاومت کششی بتن، تاثیر قابل توجهی بر بهبود مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح دارند [۷]. در راستای اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن و تاثیر این مصالح بر رفتار اعضای بتنی، تحقیقات متعددی در زمینه‌ی تحلیل عملکرد سازه‌های بتنی بازیافت شده انجام پذیرفته است [۸-۱۷]. در سال ۲۰۱۸، چابکی و همکارانش [۱۸] به بررسی اثر افزودن الیاف فولادی بر شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی پرداختند. در این بررسی که شامل آزمایش ۲۷ نمونه تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی بود، مشخص شده افزودن الیاف فولادی سبب افزایش ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری تیرهای ساخته شده از سنگدانه طبیعی شده و از کاهش شکل‌پذیری در نمونه دارای سنگدانه بازفتی جلوگیری می‌کند. در بررسی دیگری در سال ۲۰۱۹، چابکی و همکارانش [۱۹] به تاثیرگذاری افزودن الیاف فولادی بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح

ساخته شده از سنگدانه بازیافتی با فاصله خاموت مختلف پرداختند. طبق بررسی آنها مشخص شد که شکست نمونه در تیرهای دارای سنگدانه بازیافتی با فاصله خاموت بیشتر از مقدار مصاحبه شده توسط روابط آیین‌نامه‌ای، بصورت کامل برشی بوده است که افزودن الیاف سبب شکست بصورت خمشی در این نمونه‌ها شد. ژائو و ژانگ [۲۰] در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی و دارای الیاف فولادی پرداختند. در بررسی آنها الیاف فولادی با ۵ مقدار مختلف به نمونه‌ها افزوده شد. طبق بررسی آنها مشخص شد که افزودن الیاف فولادی به میزان قابل توجهی ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی را بهبود می‌دهد. در بررسی دیگری تارک و همکارانش [۲۱] در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر افزودن خرده آجر به عنوان مصالح دورریز و بازیافتی به تیرهای بتن مسلح پرداختند. در این بررسی ۲۴ عدد نمونه تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی سبب کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌ها نمی‌شود. با این وجود، کاربرد مصالح بازیافتی در موارد عملی ساخت‌وساز و مهندسی عمران نیازمند مطالعاتی در مقیاس کامل‌تر می‌باشد؛ مطالعاتی که به ارزیابی میزان واکنش بتن بازیافت شده به تغییر شکل بار بپردازد تا به نتیجه‌ی مناسبی نسبت به طراحی سازه‌ای بتوان دست یافت. در این راستا، بررسی‌های مختلفی در رابطه با عملکرد خمشی بتن‌های سازه‌ای بازیافت شده انجام گرفته است [۹، ۱۲، ۱۳، ۱۶]. با این حال، تعداد تحقیقات صورت گرفته درباره‌ی بتن‌هایی با درصد جابجایی بالا، کافی نبوده و به علاوه، برخی نتیجه‌گیری‌های متناقض نیز در این زمینه شناسایی شده‌اند. از طرفی، برخی از محققان [۸، ۱۳] به این نتیجه رسیده‌اند که تیرهای بتنی ساخته شده از مصالح بازیافتی، از انحراف بالاتر و میزان ترک‌خوردگی پایین‌تر یا برابر با تیرهای بتنی معمول برخوردارند؛ در حالی که برخی دیگر از محققان [۱۱، ۱۳] هیچگونه تفاوت قابل توجهی از لحاظ عملکرد خمشی میان بتن‌های بازیافتی و معمول مشاهده نکرده‌اند.

در سال ۲۰۱۸، گاوراو و سینق [۲۲] به بررسی اثر چسبندگی بین بتن و میلگرد در بتن‌های ساخته شده از سنگدانه بازیافتی و اثر لغزش آرماتور پرداختند. در این بررسی ۴۸ عدد تیر بتن مسلح در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها

دارای طول وصله میلگرد بودند و سنگدانه بازیافتی با درصد جابجایی مختلف در نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌ها تحت خمش چهار نقطه‌ای آزمایش شدند. نتایج بررسی آنها نشان داد که تفاوت قابل توجهی بین لغزش میلگرد در بتن ساخته شده از سنگدانه طبیعی و بازیافتی وجود ندارد. گوکسو و همکارانش [۲۳] به تاثیر وصله‌ی میلگرد بر رفتار اعضای بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت پایین و متوسط تحت بار چرخه‌ای پرداختند. در نمونه‌ها درصد آرماتور طولی متغیر در نظر گرفته شد. نتایج بررسی آنها نشان داد که استفاده از قلاب سبب جلوگیری از افت ظرفیت خمشی نمونه‌ها بدلیل ایجاد وصله می‌شود.

امروزه با توجه به پیشرفت علوم و افزایش اهمیت حفظ محیط زیست، مهندسی‌ین در تلاش هستند که از مصالح دورریز به عنوان جایگزین در ساخت مصالح جدید استفاده کنند. بر اساس پیشینه‌ی تحقیق و علی‌رغم شناسایی برخی از تفاوت‌ها، روش‌های آیین‌نامه‌ای در بتن‌های معمول را می‌توان جهت پیش‌بینی رفتار خمشی تیرهای ساخته شده از مصالح بازیافتی نیز بکار برد [۹، ۱۱، ۱۳]. در همین راستا، افزایش درشت‌دانه‌های بتنی بازیافت شده به کاهش میزان سختی بتن منجر می‌شود [۱۳] که با انحراف-های افزایش یافته در تیرهای ساخته شده از بتن بازیافتی تطابق دارد. به طور کلی، می‌توان گفت همانند بتن‌های تقویت‌شده‌ی معمول، بتن‌های بازیافتی نیز می‌تواند نیازهای مرتبط با مقاومت و سطح اطمینان در ساختمان‌ها را برطرف سازد [۹-۱۳]. با این وجود، جهت تشویق به استفاده از مصالح بازیافتی برای ساخت بتن سازه‌ای، بایستی توانایی لازم برای طراحی اعضای مختلف بتن تقویت شده با درشت‌دانه‌های بازیافتی با استفاده از روش‌های طراحی موجود لحاظ گردد [۹].

آزاد [۲۴] در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی پرداخت. در این بررسی تعداد ۱۵ عدد تیر بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی تحت خمش چهارنقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این بررسی تاثیر افزایش درصد سنگدانه بازیافتی بر رفتار تیرهای بتن مسلح بود. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش درصد سنگدانه بازیافتی به میزان ۵۰ درصد تاثیر قابل توجهی بر بیشینه ظرفیت خمشی تیرهای بتن

مسلح اتفاق نمی‌افتد در حالیکه با افزایش بیشتر از ۵۰ درصد ظرفیت خمشی نمونه کاهش می‌یابد.

بر این اساس، تحقیقات منتشرشده‌ی اخیر [۹،۱۳] جهت دستیابی به توافقی مناسب نسبت به عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح و افزایش نتایج مرتبط با بتن سازه‌ای ساخته شده از مصالح بازیافتی، تحقیقات بیشتری در مقیاس کامل باید صورت بگیرد. این امر به کسب توانایی در پیش‌بینی خواص، رفتار تیر بتنی تحت بار سرویس و بار نهایی با درجه تقریب مشابه با بتن معمول منتهی خواهد شد. افزون بر این، برخی از پارامترهای بتن مانند سختی خمشی، ظرفیت مقاومت یا رفتار ترک‌خوردگی باید با هدف طراحی ساختاری دقیق در نظر گرفته شوند. به دلیل بروز شرایطی در رابطه با قابلیت کارکرد معمول پس از ترک‌خوردگی، این پارامترها جهت طراحی صحیح ساختار بتن‌ها مورد نیاز است. ظرفیت مقاومت پس از ترک‌خوردگی را می‌توان بر اساس ارتفاع ناحیه‌ی فشاری بتن ترک‌خورده به دست آورد که به میزان تغییرشکل‌پذیری و نسبت میلگرد طولی بستگی دارد. در رابطه با رفتار ترک‌خوردگی، اکثر محققان به این نکته‌ی کلی اشاره داشته‌اند که بتن بازیافتی نشان-دهنده‌ی رفتار بدتری نسبت به بتن معمول می‌باشد [۸،۱۲]. این امر احتمالاً به میزان سختی کمتر منتهی شده که بر این اساس، زمانی که درشت‌دانه‌های بازیافتی در بخش‌های مختلف سازه‌ای به کار می‌رود، بتن از تاثیر کمتری پس از ترک‌خوردگی برخوردار است [۲۵،۲۶]. در همین راستا، انتظار می‌رود تغییر شکل بیشتر بتن بازیافتی [۲۷-۳۲] به عملکردهای خمشی متفاوتی نسبت به تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی منتهی شود. از این رو، در این پژوهش هدف اصلی بررسی اثر افزودن الیاف فولادی بر کاهش عرض ترک-خوردگی در تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی و دارای وصله میلگرد است. در تیرهای دارای وصله میلگرد کششی، کاهش مقاومت پیوستگی و لغزش میلگرد می‌تواند سبب افزایش ترک‌خوردگی و عرض ترک شود. با توجه به مسیر گسترش ترک-خوردگی و عرض آنها الگوهای ترک‌خوردگی تعیین شده است. ورود مواد اسیدی در طی ترک‌خوردگی‌ها خطر گسیختگی تیر را افزایش می‌دهد که با افزایش پوشش روی بتن و یا استفاده از بتن با مقاومت بالاتر می‌توان تا حدودی رسیدن این مواد به میلگردها را کاهش داد

[۳۳]. افزون بر این، افزایش کرنش در میلگردهای طولی و کاهش مقاومت بتن سبب افزایش بیشتر لغزش میلگرد در بتن شده و عرض ترک‌خوردگی‌ها افزایش می‌یابد [۳۴].

## ۱-۱ - بررسی عرض ترک‌خوردگی از دیدگاه آیین‌نامه‌ای

آیین‌نامه‌ها معمولاً در شرایط مختلف بهره‌برداری عرض ترک را در حدود ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر محدود می‌کنند. از این رو، با توجه به بیان دیدگاه آیین‌نامه‌ای،  $ACI-224R$  محدوده‌ی مجاز عرض ترک‌خوردگی را در شرایط بهره‌برداری گوناگون بر اساس جدول (۱) بیان می‌کند [۳۵].

جدول ۱: حداکثر مجاز عرض ترک‌خوردگی براساس  $ACI-224R$

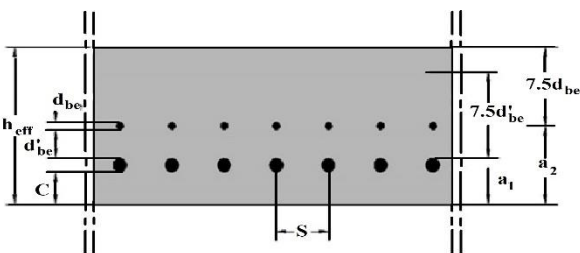
شرایط محیطی عضو	عرض مجاز ترک (میلی‌متر)
هوای خشک	۰/۴۱
هوای مرطوب با خاک	۰/۳۰
مواد شیمیایی یخ زدا	۰/۱۸
آب دریا و یا پاشش آب دریا	۰/۱۵
مخازن محتوی آب	۰/۱۰

تعیین عرض ترک‌خوردگی بطور دقیق امکان‌پذیر نبوده و به مسائل مختلفی وابسته است. روابط تجربی زیادی توسط محققین برای تعیین عرض ترک ارائه شده است. در این میان رابطه‌ی تجربی گرگلی-لوتز<sup>۱</sup> [۳۶] در تعیین عرض ترک خمشی از اعتبار بیشتری برخوردار است. رابطه‌ی گرگلی-لوتز [۳۶]، عرض ترک خمشی،  $w$  را بر حسب میلی‌متر، بصورت زیر تعیین می‌کند:

$$w = (1.08 \times 10^{-5}) \beta_h f_s \sqrt[3]{d_c A} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\beta_h$  نسبت فاصله‌ی محور خنثی از دورترین تار کششی به فاصله‌ی تار خنثی 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 موثر بتن پیرامونی میلگرد کششی است که از تقسیم سطح مقطع موثر بتن پیرامونی فولادهای

که در آن  $C$ ،  $S$ ،  $b$ ،  $d_b$  و  $A_{st}$  به ترتیب پوشش بتن، فاصله مرکز تا مرکز میلگرد (میلی‌متر)، عرض مقطع (میلی-متر)، قطر میلگرد و مساحت فولاد کششی (میلی‌متر مربع) می‌باشند. همچنین ضریب مشارکت شرایط مرزی اتصالات است که برای فولاد ساده ۰/۴ و برای فولاد آجدار ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود. ضریب کرنش است که برابر است با  $0.25(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2\varepsilon_1$  که  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  بیشترین و کمترین کرنش موثر در ناحیه مدفون هستند. همچنین ضخامت موثر ناحیه مدفون است. ضخامت این ناحیه  $(h_{eff})$  برابر است با بیشترین مقدار بین  $a_1 + 7.5d_b$  و  $a_2 + 7.5d_b$ . افزون بر این، نباید از مساحت قسمت کشش یا نصف مساحت هاشور خورده‌ی نشان داده شده در شکل (۲) بزرگتر باشد.



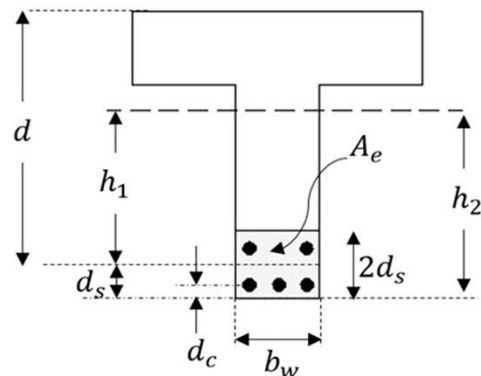
شکل ۲: ضخامت ناحیه مدفون مطابق CSA-S474-2004 [۳۸]

همچنین رابطه‌ی مشابه دیگری را برای محاسبه‌ی فاصله میانگین ترک مطابق زیر ارائه می‌دهد

$$S_{m,NS} = 2(C + 0.1S) + k_1 k_2 d_b / \rho_{INS} \quad (۵)$$

که در آن  $C$  و  $S$  به ترتیب پوشش بتن و فاصله مرکز تا مرکز میلگرد (میلی‌متر) می‌باشند. همچنین ضریب محیطی روی خوردگی فولاد است که برای فولاد آجدار برابر ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. ضریب کرنش است که برابر است با

کششی  $(A_e = 2d_s b_w)$  بر تعداد میلگردهای کششی  $N$  بدست می‌آید  $(A = \frac{A_e}{N})$ . متغیرهای مورد استفاده در رابطه (۲) در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمایش متغیرهای بکار رفته در تعیین عرض ترک خوردگی خمشی بر اساس رابطه‌ی گرگلی-لوتز [۳۶]

لازم به ذکر است که در جای گذاری کمیت  $\beta_h$  در رابطه- (۱) می‌توان به جای یک محاسبه‌ی دقیق تر، از مقدار ۱/۲ در تیرها و ۱/۳۵ در دال‌های یکطرفه استفاده کرد. همچنین منطقی خواهد بود که از مقدار  $f_s \approx 0.6f_y$  بجای یک محاسبه‌ی دقیق تر در تعیین تنش فولاد کششی تحت بارهای بدون ضریب استفاده شود. حداکثر عرض ترک خوردگی در یک عضو بتن آرمه تحت کشش مستقیم را نیز می‌توان بر اساس رابطه‌ی برومز-لوتز [۳۷] بصورت زیر تعیین کرد:

(۳)

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

با توجه به CSA-S474-2004 [۳۸] میانگین فاصله ترک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۴)

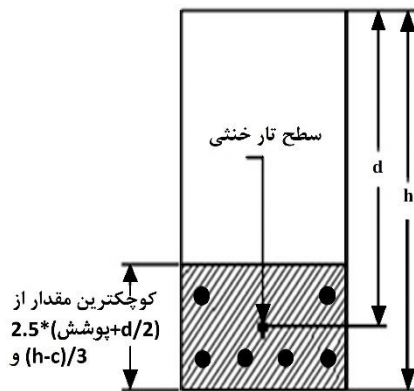
$$S_{m,CSA} = 2(C + 0.1S) + k_1 k_2 d_b h_{eff} b / A_{st}$$

الاستیسیته میلگرد اصلی و متوسط فاصله ترک خوردگی مطابق رابطه (۶) است.  $\beta$  ضریب شرایط محیطی است.

CSA-S474-2004 [۳۸] متوسط عرض ترک خوردگی را مطابق رابطه (۸) تعیین می‌کند. مطابق آیین‌نامه اروپا، اولین پارامتر تاثیرگذار بر عرض ترک خمشی پوشش بتن است. مطابق این آیین‌نامه، متوسط فاصله عرض ترک خمشی مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$S_{m,EC2} = 2C + k_1 k_2 \frac{d_b A_{ct}}{4A_{st}} \quad (۸)$$

$C$  و  $d_b$  به ترتیب پوشش بتن و قطر میلگرد طولی بر حسب میلی‌متر است. افزون بر این، نسبت مساحت موثر مقطع مسلح است و مطابق شکل (۴) محاسبه می‌شود. برای میلگرد آجدار و معمولی به ترتیب برابر  $0.18$  و  $0.16$  است. همچنین برای عضو تحت خمش برابر  $0.5$  در نظر گرفته می‌شود.



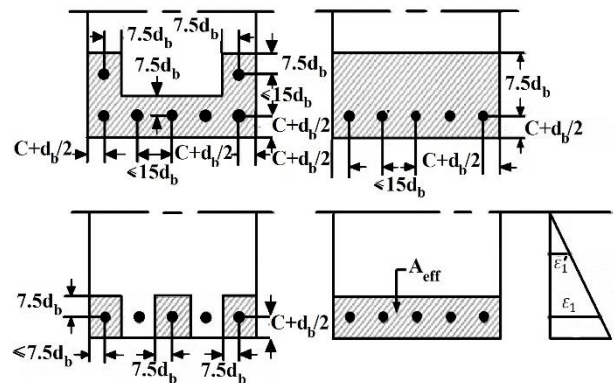
شکل ۴: مساحت موثر [۳۹]

عرض ترک خوردگی ( $W_k$ ) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{k,EC2} = \beta_{EC2} W_{m,EC2}, W_{m,EC2} = S_{m,EC2} \xi \varepsilon_{s2} \quad (۹)$$

$W_{k,EC2}$  عرض ترک و  $S_{m,EC2}$  فاصله ترک است که مطابق شکل رابطه (۸) محاسبه می‌شود. افزون بر این  $\xi$  ضریب بی‌بعدی که مقدار آن بین ۰ و ۱ است.  $\varepsilon_{s2}$  متوسط کرنش تحت ترکیبات بارگذاری بوده و شامل شرایط محصورشدگی است. همچنین  $\beta_{EC2}$  متوسط نسبت ترک خوردگی برای طراحی است.

در نظر گرفته می‌شود که  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  بیشترین و کمترین کرنش موثر در ناحیه مدفون هستند. همچنین  $\rho_{tNS}$  نسبت موثر فولاد می‌باشد که برابر  $A_{st} / A_{ct}$  که مساحت موثر مقطع بتن مطابق شکل (۳) است. این منطقه مساحت موثر فولاد در بتن کششی است.  $A_{st}$  مساحت فولاد کششی است.



شکل ۳: محاسبه مساحت موثر برای تعیین فاصله ترک خمشی مطابق [۳۹] NS-2473E

NS و CSA [۳۸ و ۳۹] به ترتیب برای تعیین عرض ترک با اختلاف کمی در شیب کرنش و محاسبه‌ی مقطع فولاد موثر روابط مشابهی را ارائه می‌دهند. مطابق آیین‌نامه NS، فاصله ترک خوردگی با توجه به رابطه زیر تعیین می‌شود. در این رابطه  $\Gamma$  ضریب همبستگی است و طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$W_{k,NS} = 1.7 W_{m,NS}, W_{m,NS} = r w \varepsilon_1 S_{m,NS} \quad (۶)$$

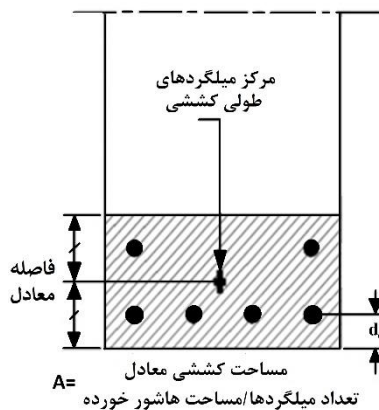
$$r = 1 - \frac{\beta}{2.5 k_1} \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \geq 0.4 \quad (۷)$$

$\varepsilon_1$  کرنش کششی بیرونی‌ترین سفره میلگرد کششی است. قابل ذکر است که توزیع تنش غیر محوری با جهت کرنش اصلی میلگردهای طولی موازی است. همچنین

مطابق آیین‌نامه  $ACI224R-01$  [۴۱] بیشینه فاصله‌ی ترک در تیر و دال با توجه به تحلیل استاتیکی تعیین می‌شود. مطابق این تحلیل، فاصله‌ی ترک خمشی به کمک رابطه‌ی زیر قابل تعیین است.

$$W_{k,ACI} = 0.076 \beta_{ACI} f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-3} \quad (14)$$

که در آن،  $W_{k,ACI}$  بیشینه فاصله‌ی ترک،  $f_s$  تنش میلگرد طولی،  $d_c$  پوشش بتن بیرونی‌ترین سرفه میلگرد و  $A$  مساحت سطح مقطع بتن است و مطابق شکل (۵) است.  $\beta_{ACI}$  برابر با فاصله بین محور بیرونی سرفه کششی بتن به فاصله بین محور افقی میلگردهای کششی در تیر است.



شکل ۵: تعیین مشخصات هندسی مقطع مطابق  $ACI224R-01$  [۴۱]

مطابق  $ACI224R-01$  [۴۱] در فاصله‌ی ترک خمشی، تنش میلگرد  $f_s$  در مقطع ترک‌خورده تحت بار به میزان  $0.67f_y$  محدود می‌شود. همچنین فاصله بین میلگرد کششی در لایه‌ی کششی بتن ( $S$ ) نباید از مقدار زیر تجاوز کند.

$$S_{(mm)} = 15 \left( \frac{95000}{540 f_s} \right) - 2.5 C_c \quad (15)$$

افزون بر این، با استفاده از افزودنی‌هایی نظیر الیاف فولادی و پوزولان یا راهکارهایی نظیر افزایش مقاومت بتن، می‌توان عرض ترک‌خوردگی‌ها و گسترش امتداد آنها را کاهش داد. استفاده از الیاف فولادی می‌تواند سبب افزایش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح شده و با انتقال مناسب تنش در سراسر میلگردهای کششی باعث کاهش ترک‌خوردگی در تیرهای بتن مسلح شود [۴۲]. رسیدن

$CEB-FIP$  [۴۰] رابطه‌ی متفاوتی را برای تعیین فاصله ترک ارائه می‌کند. مطابق این آیین‌نامه، فاصله ترک می‌تواند مطابق رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

$$S_{m,CEB} = \frac{2}{3} l_{s,max} \quad (10)$$

$l_{s,max}$  طول لغزش میلگردهای کششی است و بترتیب برای ترک نهایی و اولین ترک توسط رابطه‌ی (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$l_{s,max} = \frac{d_b}{3.6 \rho t_{CEB}} \quad (11)$$

$$l_{s,max} = \frac{\sigma_{s2}}{2\tau_b} d_b \frac{1}{1 + \alpha \rho t_{CEB}} \quad (12)$$

در روابط فوق،  $\sigma_{s2}$  تنش کششی میلگرد در بخش ترک‌خورده بر حسب مگاپاسکال،  $d_b$  قطر میلگرد بر حسب میلی‌متر،  $\tau_b$  متوسط مقدار تنش مرزی بر حسب مگاپاسکال و معادل  $1.8 f_{ctm(t)}$  است که در آن  $f_{ctm(t)}$  متوسط مقاومت کششی بتن ترک‌خورده است.  $\rho t_{CEB}$  مساحت موثر میلگرد بوده و برابر  $A_{st} / A_{ct}$  است.  $A_{st} / A_{ct}$  سطح مقطع عضو است و مطابق شکل (۴) محاسبه می‌شود. افزون بر این، برای ساده‌سازی رابطه (۱۲)، مقدار  $(1 + \alpha)$  برابر یک در نظر گرفته می‌شود که  $\alpha$  نسبت مدول الاستیسیته فولاد به بتن است  $(E_s / E_c)$ .

$CEB-FIP$  [۴۰] رابطه‌ی متفاوتی را برای تعیین فاصله ترک خمشی به صورت زیر ارائه می‌کند.

$$W_{k,CEB} = l_{s,max} (\varepsilon_{sr2} - \beta_{CEB} \varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{CS}) \quad (13)$$

$\varepsilon_{CS}$  کرنش انقباضی بتن است.  $\varepsilon_{sr2}$  تنش میلگرد در بتن تحت بار معادل  $f_{ctm}$  است که  $f_{ctm}$  از رابطه  $[ \varepsilon_{sr2} = f_{ctm} / A_{cef} (1 + \alpha \rho_{tCEB}) ]$  محاسبه می‌شود. همچنین  $\beta_{CEB}$  ابعاد ثابت است و  $\varepsilon_{sr2}$  کرنش فولاد است که می‌توان مقدار آن را برای میلگرد عرضی نادیده گرفت.



## ۲-۲- سنگدانه

در این بررسی، سنگدانه بازیافتی و طبیعی با درصد مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. سنگدانه‌های بازیافتی از تخریب نمای سنگ ساختمان قدیمی تهیه شد و با درصد جایگزینی ۰ و ۱۰۰ درصد با سنگدانه‌های طبیعی در نمونه‌ها جایگزین شد. به منظور ارزیابی مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی از آیین‌نامه‌های زیر استفاده شد.

- تعیین اندازه سنگدانه‌ها:  $ASTM - C136$  [۴۶]
- تعیین وزن مخصوص خیس:  $ASTM - C29$  [۴۷]
- تعیین وزن مخصوص ظاهری:  $ASTM - C127$  و  $ASTM - C128$  [۴۸]
- تعیین مدول بالک:  $ASTM - C127 - 88$  و  $ASTM - C128 - 88$  [۴۹]

نمونه‌ای از سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی مورد استفاده در شکل (۷) نشان داده شده است. افزون بر این منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده شده در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده جهت تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه، نتایج بدست آمده بترتیب در جدول (۲) و (۳) ارائه شده است. همانطور که از جدول (۳) مشخص است، سنگدانه‌های بازیافتی انتخاب شده از ترکیبات شیمیایی نزدیکی با سنگدانه‌های طبیعی برخوردار هستند. این موضوع سبب می‌شود تا بتوان مقایسه‌ای که بین نمونه‌های ساخته شده از سنگدانه بازیافتی با نمونه ساخته شده از سنگدانه طبیعی انجام می‌شود را قابل استناد کرد و از تاثیر مشخصات شیمیایی بر رفتار نمونه‌ها صرفه نظر کرد. افزون بر این، این مشخصات در شکل (۹) نیز ارائه شده است که طبق این شکل نیز می‌توان از اثرات مشخصات شیمیایی سنگدانه‌ها بر رفتار نمونه‌ها صرف نظر کرد. قابل ذکر است که مشخصات شیمیایی سنگدانه‌ها با انجام آزمایش اشعه ایکس بدست آمده و در شکل (۹) ارائه شده است.

اکسیژن به میلگرد سبب اکسایش آنها شده و باعث می‌شود میلگرد ترک‌خورده و در نهایت منجر به گسیختگی شود. از این رو، استفاده از پوشش اپوکسی بر روی میلگردها نیز می‌تواند سبب مقاومت در برابر اکسایش و خوردگی شود [۴۳]. افزودن الیاف فولادی بر بتن مسلح با افزایش مقاومت پیوستگی و کاهش لغزش میلگرد می‌تواند سبب کاهش عرض ترک‌خوردگی شود. در تیرهای دارای وصله بدلیل ایجاد وصله، لغزش میلگرد بیشتر شده و همین امر سبب افزایش عرض ترک‌خوردگی در محل ایجاد وصله میلگرد کششی می‌شود. استفاده از این الیاف باعث ایجاد پیوستگی بهتر بین میلگرد و بتن شده و سبب بهبود عملکرد این دو مصالح در مجاورت هم شود [۴۴]. 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 بطور عمده آغاز شد. از چهل سال پیش به مرور زمان الیاف به عنوان مصالح افزودنی به بتن اضافه شدند [۴۵]. به منظور افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن و کاهش عرض ترک‌خوردگی، با افزودن درصد حجمی مختلف الیاف فولادی به نمونه‌ها، به تاثیر الیاف بر عرض ترک‌خوردگی و نحوه گسترش امتداد ترک‌ها در اعضای دارای این الیاف پرداخته شده است.

## ۲- مشخصات نمونه‌ها و فرآیند انجام آزمایش

### ۲-۱- الیاف فولادی

در ساخت بتن الیافی از الیاف فولادی با دو انتهای خمیده بطول ۵ سانتی‌متر مطابق شکل (۶) استفاده شده است. ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی و کرنش گسیختگی الیاف بترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال، ۲/۰ گیگاپاسکال و ۳/۰ درصد است.

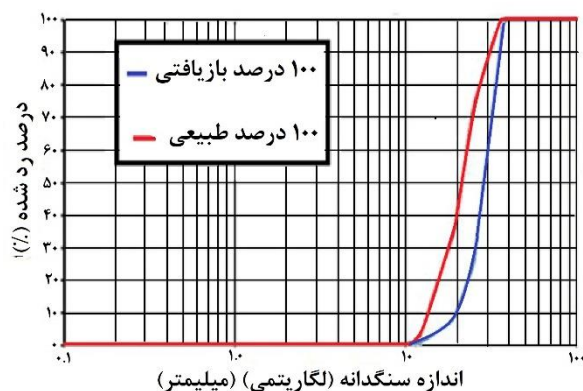
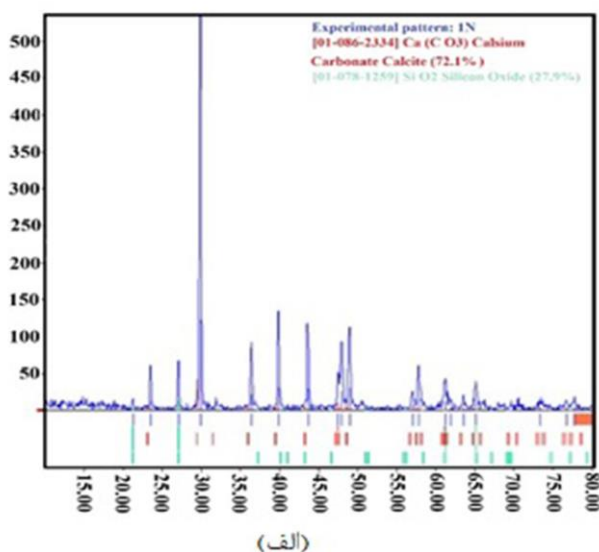


شکل ۶: الیاف فولادی مصرفی

-	-	$CaMg(CO_3)(\%)$
۱۰۰	۱۰۰	مشخصات کلی پراش (%)
۱۸/۵۸	۲۲/۲۳	میزان بازتابش (%)
۸۱/۴۲	۷۷/۷۷	پیک بازتابش (%)
۵۳/۱۵	۱۶/۰۸	بیشینه مقدار انتخاب شده (%)
-	۱۱/۱۰	بیشینه مساحت فاز A (کلسیت کلسیم کرنات) (%)
-	۴/۹۹	بیشینه مساحت فاز B (اکسید سیلیکن) (%)
۵۳/۱۵	-	بیشینه مساحت فاز A کرنات کلسیم منگزیم (%)



شکل ۷: سنگدانه‌های استفاده شده (الف) طبیعی (ب) بازیافتی



شکل ۸: منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

نوع سنگدانه	چگالی ظاهری ( $gr/cm^3$ )	مدول بالک ( $gr/cm^3$ )	جذب آب (%)	ضریب سایش (%)	تخلخل (%)
طبیعی	۲/۷۶	۲/۶۵	۱/۴۴۱	۳۱/۰	۳/۸۸
بازیافتی	۲/۶۷	۲/۵۹	۱/۱۸۵	۴۹/۲	۲/۹۹

جدول ۳: مشخصات شیمیایی سنگدانه طبیعی و بازیافتی

نوع سنگدانه	مشخصات شیمیایی	
	طبیعی	بازیافتی
-	۷۲/۱	$Ca(CO_3)(\%)$ 100R-2S
-	۲۷/۹	$SiO_2(\%)$
۱۰۰	-	$CaMg(CO_3)_2(\%)$

شکل ۹: الگوی اشعه ایکس سنگدانه‌ها (الف) بازیافتی (ب) طبیعی

## ۲-۳- میلگرد فولادی

مقاومت کششی و فشاری نمونه‌ها نزدیک به یکدیگر بوده و میتوان از

اثرات مقاومت فشاری و کششی بر رفتار نمونه‌ها صرفه نظر کرد.

در ساخت تیرهای بتن مسلح از میلگرد به قطر ۲۰ میلی-متر، ۱۰ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر بترتیب برای میلگرد کششی، فشاری و برشی استفاده شد. ذکر این نکته قابل ذکر است که در تمام نمونه‌ها آرایش میلگردها ثابت است. نتایج بدست آمده از آزمایش کشش مستقیم میلگردها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۵: طرح اختلاط بتن

نمونه	آب ( $kg/m^3$ )	سیمان ( $kg/m^3$ )	الیاف فولادی ( $kg/m^3$ )	درشت-دانه بازیافتی ( $kg/m^3$ )	درشت-دانه طبیعی ( $kg/m^3$ )	ریزدانه طبیعی ( $kg/m^3$ )
0R-0S	۱۶۵	۴۰۰	۰	۰	۸۴۰	۹۵۰
100R-0S	۱۶۵	۴۰۰	۰	۸۴۰	۰	۹۵۰
0R-2S	۱۶۵	۴۰۰	۱۵۶	۰	۶۸۵	۹۵۰
100R-2S	۱۶۵	۴۰۰	۱۵۶	۶۸۵	۰	۹۵۰

جدول ۴: نتایج آزمایش میلگردها

قطر میلگرد (میلی- متر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش تسلیم (%)	کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)
۲۰	۳۷۱	۵۶۱	۱۵/۲۷	۲۵/۸۲	۲۱۳/۱۷
۱۰	۴۰۸	۶۷۷	۱۳/۰۴	۲۵/۵۱	۲۱۰/۱۰
۸	۳۷۱	۵۶۰	۱۲/۹۴	۲۴/۹۳	۲۰۹/۲۸

جدول ۶: مقاومت کششی و فشاری نمونه

نمونه	متوسط مقاومت کششی (مگاپاسکال)	انحراف از میانگین مقاومت کششی	متوسط مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	انحراف از میانگین مقاومت فشاری
0R-0S	۴/۸۸	۰/۲۷	۳۸/۵	۱/۱۱
100R-0S	۵/۱۴	۰/۱۹	۳۷/۲	۱/۷۵
0R-2S	۶/۱۱	۰/۲۷	۳۷/۰	۱/۴۸
100R-2S	۶/۰۹	۰/۲۳	۳۶/۷	۰/۸۸

در جدول (۵) و (۶)  $R$  و  $S$  بترتیب بیانگر درصد سنگدانه‌ی بازیافتی و الیاف فولادی است.

## ۲-۵- مشخصات هندسی و میلگرد گذاری نمونه‌ها

در این پژوهش، ۱۲ عدد نمونه تیر بتن مسلح با ارتفاع مقطع ۲۰۰، عرض مقطع ۱۵۰ و طول ۱۵۰۰ میلیمتر و دارای درصد حجمی متفاوتی از الیاف فولادی ساخته شده و تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای استاتیکی قرار داده شده است. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی در شکل (۱۰) و جدول (۷) ارائه شده است.

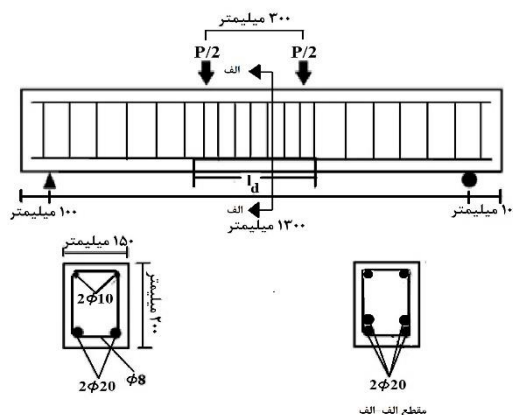
## ۲-۴- بتن

بتن استفاده شده در این بررسی از ترکیب سیمان، شن، ماسه و آب تهیه شده است. الیاف فولادی با درصد حجمی ۰ و ۲ درصد به نمونه‌ها افزوده شد. سپس فوق روان کننده تا توزیع یکنواخت الیاف به مخلوط اضافه شد. همچنین سنگدانه‌ی بازیافتی با درصد جایگزینی ۰ و ۱۰۰ درصد به مخلوط بتن اضافه شد. طرح اختلاط بتن‌های استفاده شده در جدول (۵) ارائه شده است. قابل ذکر است که بدلیل نزدیک بودن مشخصات سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی، نسبت آب به سیمان برای تمام ترکیبات برابر ۰/۴۱ بدست آمد. به منظور تعیین مقاومت فشاری و کششی نمونه، از هر نمونه طرح اختلاط، شش نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه شد. نمونه زیر جک هیدرولیکی مطابق  $BS-EN-12390-2$ ،  $BS-EN-12390-1$  و  $ASTM-C293-08$  [۵۴-۵۰] آزمایش شدند. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در جدول (۶) ارائه شده است. طبق این جدول مشخص می‌شود که نتایج مربوط به

کاهش داده شده، معادل ۲۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین در بعضی نمونه‌ها سنگدانه بازیافتی به طور کامل جایگزین درشت‌دانه‌ها شده است.

### ۳- دستگاه انجام آزمایش

نمونه‌های تهیه شده بعد از ۲۸ روز در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد تحت خمش چهارنقطه‌ای قرار داده شدند. فاصله‌ی بین نقطه‌های بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر بود. بارگذاری بصورت کنترل جابجایی انجام شد و بارگذاری تا زمان تسلیم نمونه‌ها انجام شد. تغییر شکل تیر در هر مرحله به کمک *LVDT* قرار داده شده در وسط تیر اندازه‌گیری شد. در شکل (۱۱) نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۰: ابعاد هندسی نمونه‌ها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه و بارگذاری

جدول ۷: نامگذاری و مشخصات اصلی نمونه‌های آزمایش شده

نام نمونه	سنگدانه بازیافتی (%)	الیاف فولادی (%)	طول وصله میلی‌متر
OR-OS-ld	۰	۰	۴۳۰
OR-OS-0.8ld	۰	۰	۳۴۰
OR-OS-0.6ld	۰	۰	۲۶۰
100R-OS-ld	۱۰۰	۰	۴۳۰
100R-OS-0.8ld	۱۰۰	۰	۳۴۰
100R-OS-0.6ld	۱۰۰	۰	۲۶۰
OR-2S-ld	۰	۲	۴۳۰
OR-2S-0.8ld	۰	۲	۳۴۰
OR-2S-0.6ld	۰	۲	۲۶۰
100R-2S-ld	۱۰۰	۲	۴۳۰
100R-2S-0.8ld	۱۰۰	۲	۳۴۰
100R-2S-0.6ld	۱۰۰	۲	۲۶۰

در جدول ۷،  $l_d$  طول وصله‌ی محاسباتی است که توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود. مساحت میلگردهای فشاری و کششی در نمونه‌ها بترتیب ۱۵۷ و ۶۲۸ میلی‌متر مربع است. فاصله‌ی مرکز ثقل میلگردهای کششی و فشاری از دورترین تارهای فشاری مقطع، بترتیب برابر با ۱۶۵ و ۳۰ میلی‌متر است و طول وصله‌ی کششی توسط رابطه‌ی (۱)، ۴۳۰ میلی‌متر محاسبه شده است. این طول وصله در نمونه‌هایی که طول وصله‌ی آنها برابر  $0.8l_d$  کاهش داده شده، معادل ۳۴۰ میلی‌متر و نمونه‌هایی که طول وصله آنها برابر  $0.6l_d$



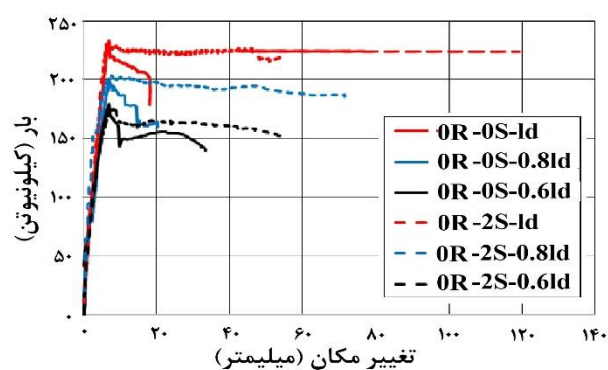
شکل ۱۱: دستگاه بارگذاری و نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها

### ۴- بررسی نتایج

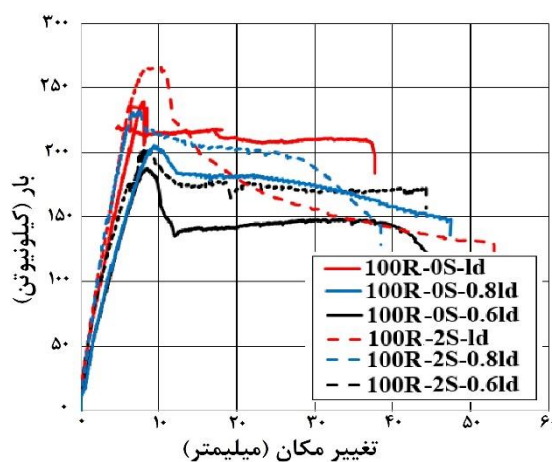
در این بررسی، دوازده نمونه آزمایشگاهی ساخته شد. در نمونه سنگدانه بازیافتی با درصد جایگزینی ۰ و ۱۰۰ درصد استفاده شد. به منظور افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن، الیاف فولادی با درصد حجمی ۰ و ۲ درصد به نمونه‌ها افزوده شد. بار محاسباتی، بار کل جک است. بارگذاری تا لحظه‌ی نهایی گسیختگی تیر افزایش

داده شد به منظور بررسی اثر لغزش میلگرد و ظرفیت نمونه‌ها، منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌ها بدست آمد و در شکل (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

میلگرد و بتن بدلیل قطع میلگرد در وسط دهانه‌ی نمونه است. کاهش ظرفیت خمشی و افزایش لغزش بین میلگرد و بتن سبب افزایش ترک‌خوردگی و افزایش عرض ترک در بتن شود. در مقایسه‌ی شکل (۱۲) و (۱۳)، با افزودن سنگدانه‌ی بازیافتی ظرفیت خمشی تغییر قابل توجهی نکرده است. این موضوع در حالی است که افزودن سنگدانه‌ی بازیافتی سبب افزایش قابل توجه تغییر مکان نمونه می‌شود و تقریباً به میزان ۱/۵ برابر تغییر مکان نسبت به نمونه ساخته شده از سنگدانه طبیعی افزایش یافته است. از طرف دیگر، در هر دو نمونه ساخته شده از سنگدانه بازیافتی و طبیعی، افزودن الیاف فولادی تاثیر بسزایی بر بیشینه تغییر مکان نمونه داشته است که این امر بدلیل افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن بوده است. این موضوع در حالیست که مطابق شکل (۱۲) و (۱۳)، استفاده هم زمان الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی تاثیر قابل توجهی بر بیشینه ظرفیت باربری نمونه داشته است. با این حال بیشینه تغییر مکان نمونه به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با زمانی که الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاهش پیدا کرده است. با توجه به منحنی‌های بار-تغییر مکان، ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک‌ها نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

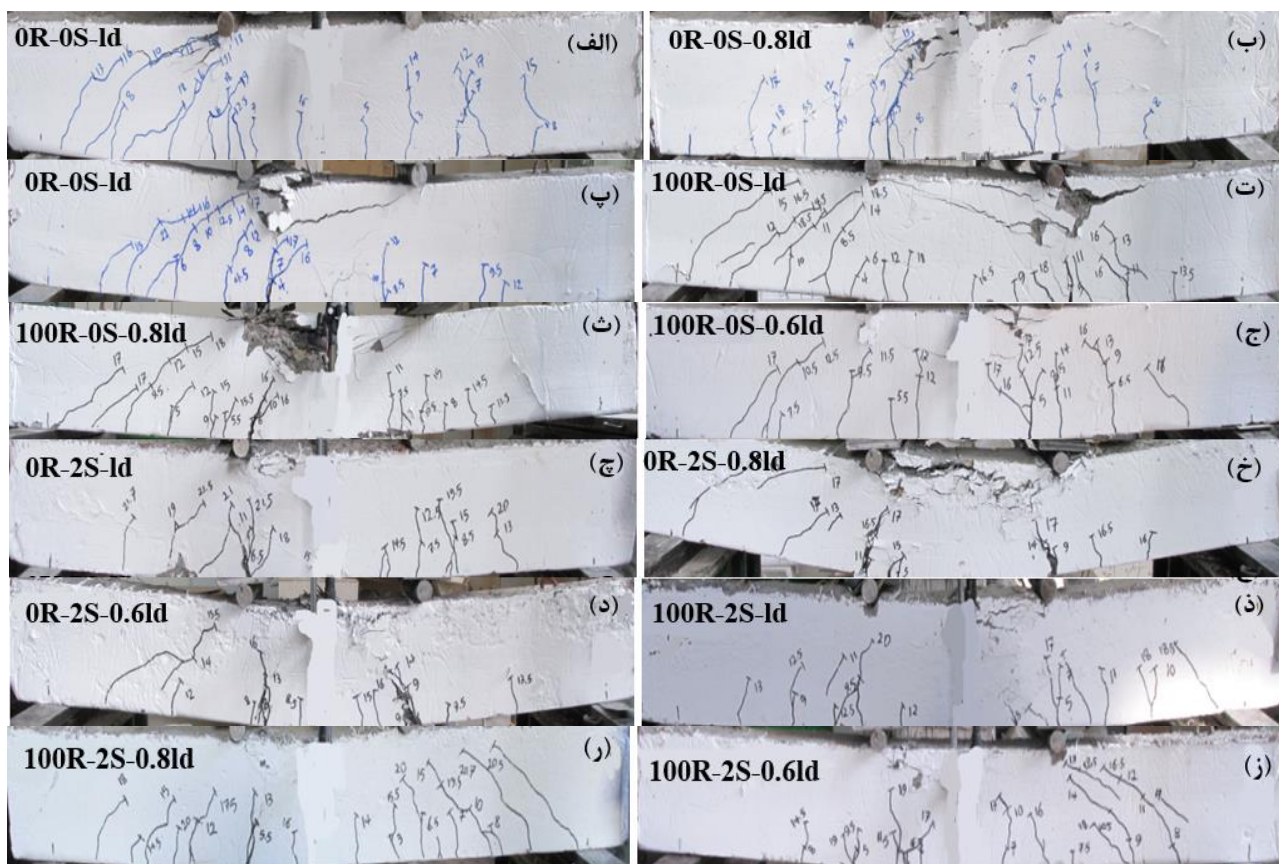


شکل ۱۲: منحنی بار-تغییر مکان نمونه فاقد سنگدانه بازیافتی



شکل ۱۳: منحنی بار-تغییر مکان نمونه دارای سنگدانه بازیافتی

مطابق شکل (۱۲) و (۱۳) کاهش طول وصله‌ی میلگرد در نمونه دارای سنگدانه طبیعی و سنگدانه بازیافتی سبب کاهش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح می‌شود. علت این امر افزایش لغزش بین



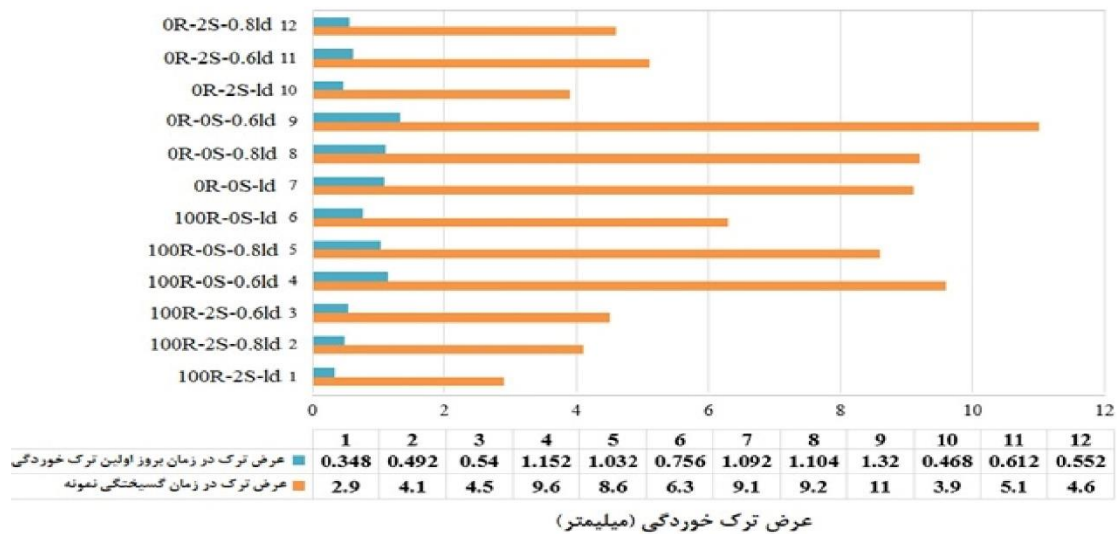
شکل ۱۴: شکست نمونه ها و مسیر گسترش ترک خوردگی در نمونه‌ها تحت بار استاتیکی

ترک‌ها افزایش بیشتری پیدا کرده و تمرکز ترک خوردگی در وسط دهانه تیر و در ناحیه با بیشترین لنگر خمشی و وصله اتفاق افتاد. در این دو نمونه نسبت به نمونه‌ی اول با طول وصله کامل، با افزایش بار امتداد ترک‌ها افزایش بیشتری یافته و تا دورترین تارهای فشاری مقطع امتداد پیدا کرده و تیر بصورت سریع و ناگهانی گسیخته شد. مطابق شکل‌های (۱۴-ت)، (۱۴-ث) و (۱۴-ج)، با جایگزین کردن سنگدانه بازیافتی، ترک‌ها گسترش بیشتری پیدا کرده و عرض ترک‌ها کاهش یافته است (در مقایسه با نمونه ساخته شده از سنگدانه طبیعی). در این نمونه‌ها با کاهش طول وصله، ترک‌ها از حالت مورب در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها به وسط دهانه‌ی تیر و در محل بیشترین لنگر خمشی و وصله‌ی میلگرد معطوف شده‌اند. با افزودن الیاف فولادی بدلیل افزایش پیوستگی بین بتن و عرض ترک خوردگی و انتقال تنش در ترک خوردگی از طریق الیاف عرض ترک خوردگی و همچنین گسترش و توزیع ترک‌ها به میزان قابل توجهی کاهش پیدا

مطابق شکل (۱۴-الف)، در نمونه  $OR-OS-1d$  بدلیل کافی بودن طول وصله، وصله‌ها به مانند میلگرد یکپارچه عمل کرده و بدلیل توزیع تنش در سراسر میلگرد 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 خنثی مقطع و افزایش ترک خوردگی‌های مورب، نمونه گسیخته شد. در دو نمونه  $OR-OS-0.6ld$  و  $OR-OS-0.8ld$  (شکل‌های ۱۴-ب و ۱۴-پ) به دلیل ناکافی بودن طول وصله، ترک خوردگی‌ها بیشتر در وسط دهانه و در محل جدایش وصله اتفاق افتاده است. دلیل این امر بیشتر بودن لغزش میلگرد در وسط دهانه و انتقال تنش بیشتری به بتن است. با افزایش لغزش میلگردهای کششی عرض

کرده است. مطابق شکل (۱۴-ج)، (۱۴-خ) و (۱۴-د) با افزودن الیاف فولادی، امتداد ترک‌ها کاهش پیدا کرده است و ترک‌خوردگی تا نزدیکی تار خنثی امتداد پیدا کرده و نمونه با تغییر شکل بیشتری گسیخته شد. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است تفاوت قابل توجهی بین بروز ترک‌خوردگی در نمونه با طول وصله‌ی کامل و کاهش یافته وجود ندارد. با توجه به شکل (۱۴-د)، (۱۴-ر) و (۱۴-ز)، افزودن الیاف فولادی به نمونه ساخته شده از سنگدانه بازیافتی سبب افزایش تعداد ترک‌خوردگی می‌شود. این در حالی است که

امتداد مسیر ترک‌ها کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. افزون بر این، عرض ترک‌خوردگی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده و نمونه با عرض ترک کمتری گسیخته شده است. عرض ترک‌خوردگی با توجه به میزان بار به کمک خط‌کش مدرج اندازه‌گیری شد. در شکل (۱۵) عرض ترک‌خوردگی در دو لحظه وقوع اولین ترک و شکست نمونه نشان داده شده است. افزون بر این، نتایج بدست آمده از انجام آزمایش با روابط ارائه شده مورد مقایسه قرار داده شد و نتایج بدست آمده در جدول (۸) ارائه شده است.



شکل ۱۵: حداکثر عرض ترک‌خوردگی نمونه‌ها در دو لحظه وقوع اولین ترک و شکست نمونه

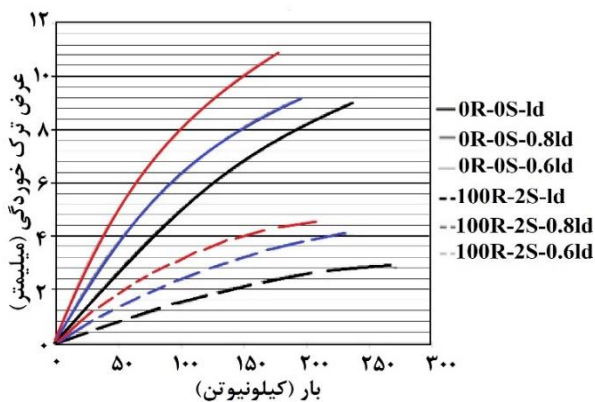
۴/۱	100R-2S-0.8ld	۸/۶	100R-0S-0.8ld
۴/۵	100R-2S-0.6ld	۹/۶	100R-0S-0.6ld
۴/۰	مقدار مجاز $ACI$ [۳]		
۱/۲	گرگلی-لوتز [۴]		
۱/۳	برومز-لوتز [۵]		

طبق جدول (۸)، ترک‌خوردگی در نمونه‌ها بیشتر از نتایج بدست آمده توسط روابط است و این روابط باید به میزان قابل توجهی اصلاح شوند. از این رو، با توجه به نتایج بدست آمده، رابطه‌ای دو ضابطه‌ای تقریبی در دو حالت استفاده از الیاف فولادی و بدون الیاف

جدول ۸: مقایسه عرض ترک خمشی

نمونه	حداکثر عرض ترک خوردگی (میلی-متر)	نمونه	حداکثر عرض ترک خوردگی (میلی-متر)
OR-0S-ld	۹/۱	OR-2S-ld	۳/۹
OR-0S-0.8ld	۹/۲	OR-2S-0.8ld	۴/۶
OR-0S-0.6ld	۱۱/۰	OR-2S-0.6ld	۵/۱
100R-0S-ld	۶/۳	100R-2S-ld	۲/۹

عرض ترک خوردگی‌ها در هر نمونه در طول بارگذاری به کمک کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مطابق شکل (۱۶) افزودن سنگدانه بازیافتی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش عرض ترک خوردگی دارد و به طور متوسط ۲۲ درصد عرض ترک خوردگی را کاهش می‌دهد. افزودن الیاف فولادی در کاهش عرض ترک خوردگی بسیار موثر است و عرض ترک خوردگی را بصورت متوسط در نمونه به میزان ۶۷ درصد کاهش می‌دهد (شکل ۱۷). از طرف دیگر استفاده توأم سنگدانه بازیافتی و الیاف فولادی مطابق آنچه در شکل (۱۸) نشان داده شده است سبب کاهش عرض ترک خوردگی به میزان ۷۰ درصد می‌شود. شکل ۱۷: بار متناظر با بروز ترک خوردگی در نمونه دارای سنگدانه طبیعی و الیاف فولادی



شکل ۱۸: بار متناظر با بروز ترک خوردگی در نمونه دارای سنگدانه طبیعی، بازیافتی و الیاف فولادی

فولادی بدست آمده و مطابق رابطه‌ی (۱۶-۱) و (۱۶-۲) با توجه به در نظر گرفتن اثر الیاف فولادی پیشنهاد می‌شود.

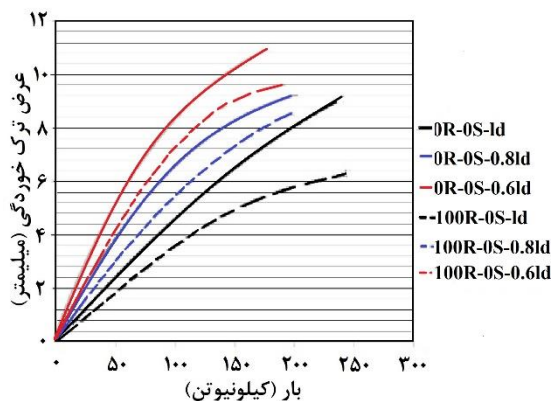
$$w_{\max} = f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-4} \quad (1)$$

نمونه فاقد الیاف فولادی

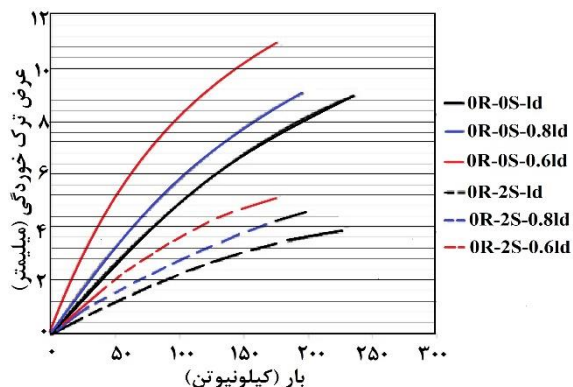
$$w_{\max} = 4.66 f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-5} \quad (2)$$

نمونه دارای الیاف فولادی

افزون بر این، در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) عرض ترک خوردگی با توجه به افزایش بار برای نمونه‌ها با در نظر گرفتن طول وصله، درصد جایگزینی سنگدانه و الیاف فولادی مشخص شده است.



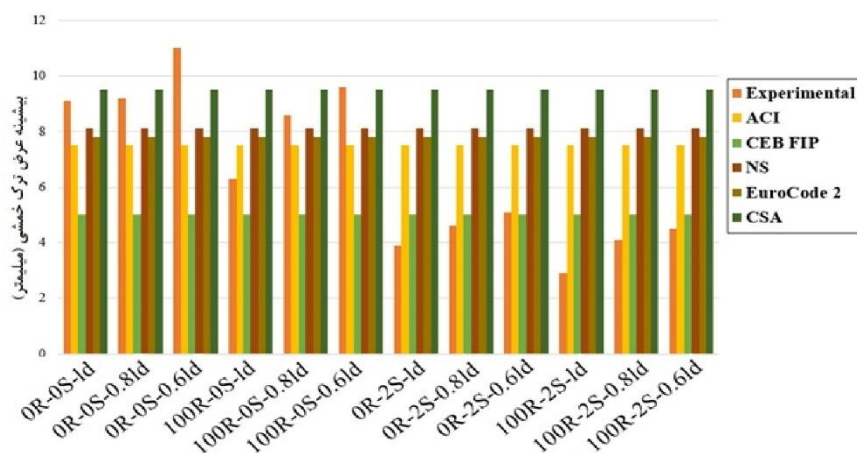
شکل ۱۶: بار متناظر با بروز ترک خوردگی در نمونه دارای سنگدانه بازیافتی و طبیعی





تیرهای بتن مسلح مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

با توجه به اثرگذاری سنگدانه بازیافتی و الیاف فولادی بر کاهش عرض ترک خوردگی، نتایج بدست آمده از برنامه آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها به منظور پیش‌بینی عرض ترک خمشی در



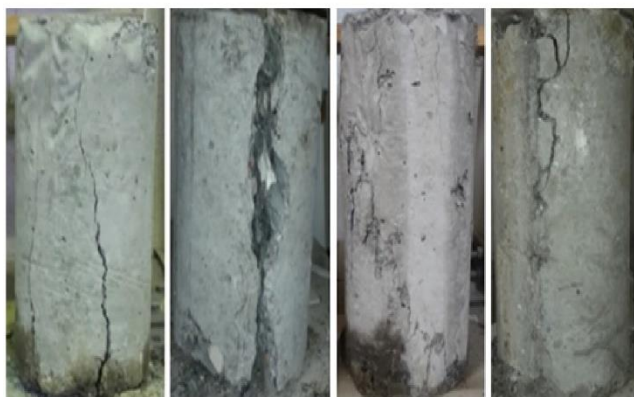
شکل ۱۹: مقایسه عرض ترک خوردگی در لحظه گسیختگی با نتایج آزمایش

مطرح شده اثر لغزش آرماتور بر افزایش عرض ترک و همچنین تاثیر افزودن مصالح افزودنی نظیر الیاف فولادی بر کاهش عرض ترک را مد نظر قرار نمی‌دهند. همچنین، روابط ذکر شده تاثیر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی را مد نظر قرار نمی‌دهند. این موضوع در حالی است که سنگدانه‌های بازیافتی دارای سطوح شکسته بیشتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی است. سنگدانه‌های طبیعی بدلیل تهیه شدن از بستر رودخانه و یا شکستن سنگ طبیعی به کمک دستگاه در کارخانه دارای سطوح تیز گوشه‌ی کمتری هستند که این موضوع در سنگدانه‌های استفاده شده در این بررسی کاملاً مشهود بود. در نتیجه اثر استفاده از سنگدانه بازیافتی در نمونه‌ها بر عرض ترک‌ها باید مد نظر قرار داده شود که این موضوع توسط آیین‌نامه‌ها مورد توجه قرار نگرفته است.

به منظور بررسی علت جامع‌تر اثرگذاری الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی بر رفتار تیرهای بتن مسلح، اثر افزودن الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی بر رفتار فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

مطابق شکل (۱۹) در نمونه‌ی ساخته شده از سنگدانه طبیعی و فاقد الیاف فولادی، آیین‌نامه *ACI*، *NS*، *EuroCode2* و *CSA* عرض ترک خمشی را برای هر سه طول وصله بصورت قابل قبول و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. افزون بر این، در حالتی که نمونه از جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی تهیه شده است آیین‌نامه *ACI*، *NS*، *EuroCode2* و *CSA* در حالتی که طول وصله کاهش یافته، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند در حالیکه در نمونه با طول وصله میلگرد کامل نتایج ارائه شده توسط *ACI* و *CEB-FIP* قابل قبول تر است. از طرف دیگر، زمانی که الیاف فولادی و یا ترکیب الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی در نمونه استفاده شود، تنها نتایج بدست آمده از *CEB-FIP* و تنها برای حالات تیر بتن مسلح با وصله کاهش داده شده قابل قبول است و در نمونه با طول وصله کامل، هیچ کدام از آیین‌نامه‌ها عرض ترک خمشی را به درستی پیش‌بینی نمی‌کنند. علت این موضوع را می‌توان اینطور بیان کرد که آیین‌نامه‌های

این در حالی است که افزودن الیاف فولادی مانع از شکست نمونه به دو قسمت شده و نمونه با ایجاد لهیدگی (تغییر شکل بدون فروپاشی و شکست) مطابق شکل (۲۱) تسلیم می‌شود. افزون بر این، استفاده از سنگدانه بازیافت سبب ضعف کششی در نمونه می‌شود که این ضعف با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌ها قابل جبران است. از این رو، افزودن الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی شده است در حالی که استفاده از سنگدانه بازیافتی باعث کاهش نامحسوس مقاومت کششی در نمونه‌ها شده است.



OR-OS 100R-OS OR-2S 100R-2S

شکل ۲۱: اثر افزودن الیاف فولادی و درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر رفتار کششی (آزمایش برزیلی) بتن

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر الیاف فولادی بر ترک خوردگی و مسیر گسترش ترک در تیر بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی دارای وصله میلگرد کششی تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق شامل ۱۲ نمونه تیر بتن مسلح بود. منحنی بار-تغییر مکان، عرض ترک خوردگی‌ها، مسیر گسترش ترک، افزایش عرض ترک خوردگی و متناظر با افزایش بار و تاثیر افزودن الیاف فولادی بر ترک خوردگی و گسیختگی بتن مسلح شده مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر این نتایج بدست آمده با روابط ارائه شده در آیین‌نامه مورد *EuroCode2* و *CEB-FIP, NS, CSA, ACI*

نتایج این بررسی در شکل (۲۰) برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. افزودن الیاف فولادی باعث می‌شود تا ترک خوردگی تنها در پوسته‌ی بتن اتفاق افتاده و نمونه فروپاشد که این موضوع با افزودن ۲ درصد الیاف فولادی محسوس‌تر شده است. همانطور که از تئوری سازه‌های بتنی مشخص است، خرابی نمونه استوانه‌ای تحت فشار بدلیل ضعف بتن در کشش و بروز ترک مورب اتفاق می‌افتد که در وسط نمونه سبب بروز تغییر شکل رو به بیرون می‌شود که این موضوع سبب بروز کشش در وسط نمونه استوانه‌ای می‌شود. در نتیجه، علت این موضوع را می‌توان این چنین بیان کرد که علت خرابی بتن ضعف در کشش است و در نمونه‌های استوانه‌ای بتن با تخریب هسته میانی نمونه شکسته می‌شود. از این رو، با افزودن الیاف فولادی یک هسته مقاوم در نمونه بتنی ایجاد می‌شود که مانع از فرو پاشیدن آن شده و تنها پوسته نمونه ترک خورده و خراب می‌شود. از طرف دیگر جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی بدلیل بیشتر بودن سطوح شکسته در قیاس با سنگدانه طبیعی بهتر به خمیر سیمان آغشته شده و مانع از فروپاشیدگی کامل نمونه می‌شود.



OR-OS 100R-OS OR-2S 100R-2S

شکل ۲۰: اثر افزودن الیاف فولادی و درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر رفتار فشاری بتن

افزون بر رفتار فشاری، رفتار کششی نمونه‌های بتنی دارای سنگدانه بازیافتی و الیاف فولادی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور این بررسی، شکست نمونه‌ها تحت آزمایش برزیلی (کشش غیر مستقیم) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این بررسی در شکل (۲۱) نشان داده شده است. طبق این شکل در نمونه فاقد الیاف فولادی، نمونه تحت کشش غیر مستقیم به دو قسمت تقسیم می‌شود.

مقایسه قرار گرفت. بر اساس اطلاعات بدست آمده از انجام این آزمایش‌ها، نتایج زیر بدست آمده است:

(۱) افزودن الیاف فولادی سبب کاهش لغزش میلگردهای کششی در محل وصله شده و عرض ترک خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد. با افزودن الیاف فولادی به میزان ۲ درصد حجمی در نمونه دارای وصله کاهش یافته  $0.8l_d$  و  $0.6l_d$  و افزودن الیاف فولادی به میزان ۲ درصد حجمی و ۱۰۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی می‌توان به ترتیب حداقل به میزان ۶۷ و ۷۰ درصد عرض ترک خوردگی را کاهش داد.

(۲) افزودن الیاف فولادی به دلیل افزایش مقاومت پیوستگی باعث کاهش توزیع ترک در سراسر عضو شده و باعث تمرکز ترک خوردگی‌ها در میانه دهانه تیر و در محل وصله می‌شود.

(۳) کاهش طول وصله سبب کاهش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح می‌شود. با افزودن سنگدانه بازیافتی در مقایسه با نمونه دارای سنگدانه طبیعی، ظرفیت تغییر قابل توجهی نکرده با این تفاوت که تغییر مکان نمونه به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و تقریباً به ۱/۵ برابر تغییر مکان نمونه ساخته شده از سنگدانه طبیعی افزایش یافته است.

(۴) افزودن الیاف فولادی تاثیر بسزایی بر بیشینه تغییر مکان نمونه داشته است که این امر بدلیل افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن بوده است. از طرف دیگر استفاده هم زمان الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی تاثیر قابل توجهی بر بیشینه ظرفیت باربری نمونه داشته با این حال بیشینه تغییر مکان نمونه به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با زمانی که الیاف فولادی و سنگدانه بازیافتی به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاهش پیدا کرده است.

(۵) با جایگزین کردن سنگدانه بازیافتی، ترک‌ها گسترش بیشتری پیدا کرده و عرض ترک‌ها کاهش یافته است. در این نمونه‌ها با کاهش طول وصله، ترک‌ها از حالت مورب در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها به وسط دهانه تیر و در محل بیشترین لنگر خمشی و وصله میلگرد معطوف شده‌اند. با افزودن الیاف فولادی بدلیل افزایش پیوستگی بین بتن و میلگرد، عرض ترک خوردگی و

انتقال تنش در ترک خوردگی از طریق الیاف عرض ترک خوردگی و همچنین گسترش و توزیع ترک‌ها به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

(۶) در نمونه ساخته شده از سنگدانه طبیعی و فاقد الیاف فولادی، آیین‌نامه *ACI*، *NS*، *EuroCode2* و *CSA* عرض ترک خمشی را برای هر سه طول وصله بصورت قابل قبول و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. افزون بر این، در حالتی که نمونه از جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی تهیه شده است آیین‌نامه *ACI*، *NS*، *EuroCode2* و *CSA* در حالتی که طول وصله کاهش یافته نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند در حالیکه در نمونه با طول وصله میلگرد کامل، نتایج ارائه شده توسط *ACI* و *FIP-CEB* منطقی‌تر است.

(۷) افزودن الیاف فولادی باعث می‌شود تا ترک خوردگی تنها در پوسته بتن نمونه استوانه‌ای تحت فشار اتفاق افتاده و نمونه فرونیاشد که این موضوع با افزودن ۲ درصد الیاف فولادی محسوس‌تر شده است.

(۸) نمونه فاقد الیاف فولادی تحت کشش غیر مستقیم به دو قسمت تقسیم می‌شود. این در حالی است که افزودن الیاف فولادی مانع از شکست نمونه به دو قسمت شده و نمونه با ایجاد لهیدگی تسلیم می‌شود. افزون بر این استفاده از سنگدانه بازیافتی سبب ضعف کششی در نمونه می‌شود که این ضعف با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌ها قابل جبران است.

## ۶- مراجع

- [1] Esfahani, M, R. and Kianoush, M, R., "Development/Splice length of Reinforcing Bars" *ACI Structural Journal*, V. 102, No. 1, January – February 2005.
- [2] ACI 544.1R-02, State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete. 2002.
- [3] Yoo. D. y., Yoon. Y. S and Banthia. N., "Flexural response of Steel-fiber-reinforced beams: Effects of strength, fiber constant and strain-rate". *Cement & concrete Composites*, 25 February 2015.
- [4] Ji. Y., Hu. Y., Zhang. L and Bao. Z., "Laboratory studies on influence of transverse cracking on chloride-induced corrosion rate in concrete" *Cement & concrete Composites*. S0958-9465(15)30062-7. 26 December 2015.

- concrete beams”, *Construction and Building Materials*, Volume 186, pp. 400-422. 2018.
- [19] Chaboki. H. R., Ghalehnovi. M., Karimipour. A., de Brito. J. and Khatibinia. M. “Shear behaviour of concrete beams with recycled aggregate and steel fibres”, *Construction and Building Materials*; Volume 204, pp. 809-827. 2019.
- [20] Gao. D. and Zhang. L. “Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete” *Construction and Building Materials*, 159: 126–136. 2018.
- [21] Tarek. T. M., Das. H. K., Mahmood. A. H., Rahman. M. N and Awal. M. A. “Flexural performance of RC beams made with recycled brick aggregate”, *Construction and Building Materials*, 134: 67–74. 2017.
- [22] Gaurav. G. and Singh, B. “Experimental investigation of bond behavior with tension lap splice for deformed steel bars in recycled aggregate concrete” *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 7, Issue 2, 98-121. 2018.
- [23] Goksu, C., Yilmaz, H., Chowdhury, S. R., Orakcal, K. and Ilki, A. “The Effect of Lap Splice Length on the Cyclic Lateral Load Behavior of RC Members with Low-Strength Concrete and Plain Bars” *Advances in Structural Engineering*, Vol. 17: 5, 639-658. 2016.
- [24] Azad A. M. “Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete” *Construction and Building Materials*, 155: 593–604. 2017.
- [25] Banthia. N., Gupta. R. and Mindess. S. “Developing crack resistant SFRC overlay materials for repair applications” *NSF Conference, Bergamo*, Italy. 2004,
- [26] Banthia. N. and Sheng. J. “Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites” *Cement and Concrete Composites*, 18: 251-269. 1996.
- [27] Bindiganavile. V. and Banthia. N. “Polymer and steel fiber reinforced cementitious composites under impact loading, Part 1: Bond-Slip Response” *American Concrete Institute, Materials Journal*, 98(1): 10-16. 2001.
- [28] ACI 318-08, Building code requirement for structural concrete and commentary, Reported by ACI committee 318. 2008.
- [29] CSA A23.3-14, Design of concrete structures, a trademark of the Canadian Standards Association, operating as “CSA Group” published in June 2014 by CSA Group. 2014.
- [30] CEB-FIP Model Code 2010 Volume 2, International Federation for Structural Concrete (fib). 2010.
- [31] Cohn, M.Z. and Bartlett, M. “Computer-simulated flexural test of partially pre-stressed concrete section”, *ASCE Journal of Structural Division* 5: 2747-2765. 1982.
- [32] ASTM C136 / C136M-14 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.
- [5] Lagier. F. Massicotte. B and Charron. J. P., "Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC", *Construction and Building Materials*, 26 May 2015.
- [6] Shah. P. S, "Do Fibers increase the tensile strength of cement Based material", *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov. 1991.
- [7] 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.
- [8] Arora, S. and Singh. S. P. “Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates” *Construction and Building Materials*, 102: 782–791. 2016.
- [9] Choi. W. C. and Yun. H. D. “Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate” *Materials and Design*, 51: 742–750. 2013.
- [10] Guo. Y., Zhang. J., Chen. G. and Xie. Z. “Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fiber, subjected to elevated temperatures” *Journal of Cleaner Production*, 72: 193–203. 2014.
- [11] Carneiro. J.A., Lima. P.R.L., Leite. M.B. and Filho, R.D. “Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 46: 65–72. 2014.
- [12] Meda, A., Minelli, F. and Plizzari, G.A. “Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced concrete”, *Composites, Part B*, 43: 2930–2937. 2012.
- [13] Soutsos, M.N., Le, T.T. and Lampropoulos, A.P. “Flexural performance of fiber reinforced concrete made with steel and synthetic fibers”, *Construction and Building Materials*, 36: 704–710. 2012.
- [14] Seara-Paz S., González-Fontebo. B., Martínez-Abella. F. and Eiras-López. J. “Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate” *Engineering Structures*, 156: 32–45. 2018.
- [15] Tošić. N., Marinkovic. S. and Ignjatovic. I “A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions”, *Construction and Building Materials*, 127 932–944. 2016.
- [16] Zaetanga. Y, Sata. V, Wongs. A and Chindaprasir. P “Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate” *Construction and Building Materials*, Volume 111, 15 May, Pages 15-21. 2016.
- [17] Weiss. W.J., Shah. S.P. “Recent trends to reduce shrinkage cracking in concrete pavements” *Proceedings of the Airfield Pavement Conference, Aircraft/Pavement Technology: In the Midst of Change*, pp. 217-228. 1997.
- [18] Chaboki. H. R., Ghalehnovi. M., Karimipour. A. and de Brito. J. “Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate

- [49] ASTM C128-15 (2015) Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [50] ASTM C33-03 (2003) Standard specification for concrete aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [51] ASTM C293-08 (2008) Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading), ASTM International.
- [52] BS EN 12390 1 (2000) Testing hardened concrete: shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, British Standards Institution, 2000.
- [53] BS EN 12390-3 (2009) Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens 19, British Standards Institution, 2009.
- [54] BS EN 12390-2 (2000) Testing hardened concrete: Making and curing specimens for strength tests, British Standards Institution, 2000.
- [33] 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.
- [34] Carmo. R. N. D., Valenca. J., Silva. D and Dias-da-Costa. D., " Assessing steel strains on reinforced concrete members from surface cracking pattern" *Construction and building materials*. 265-275. 9 august 2015.
- [35] ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structure.,2001.
- [36] 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.
- [37] Broms, 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.
- [38] CSA A23.3-14, Design of concrete structures, A trademark of the Canadian Standards Association, operating as "CSA Group" published in June 2014 by CSA Group. 2014.
- [39] Norwegian Council for Building Standardization, NS 3473E. Concrete structures design rules. Norwegian Council for Building Standardization. Norway; (2003).
- [40] CEB-FIP Model Code 2010 Volume 2, International Federation for Structural Concrete (fib). 2010
- [41] ACI 544.1R-02, State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete.2002.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Lagier. F. Massicotte. B and Charron. J. P., "Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC", *Construction and Building Materials*, 26 May 2015.
- [45] Shah. P. S, "Do Fibers increase the tensile strength of cement Based material", *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov. 1991.
- [46] ASTM C136 / C136M-14 (2014) Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [47] ASTM C29 / C29M-09 (2009) Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [48] ASTM C127-12 (2012) Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.