

# بررسی تأثیر الیاف فولادی در گسترش ترک در تیرهای بتن مسلح بازیافتی دارای وصله‌ی میلگرد

مازیار فرخ‌پور تبریزی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

منصور قلعه نوی\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

آرش کریمی پور (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه گزاس ال پاسو، آمریکا

مهندسی عمران شریف، پاییز (۱۳۹۹)  
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۳/۲، ص. ۱۲۳-۱۰۹

در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن درصد حجمی ۰٪ و ۲٪ از الیاف فولادی دو سر خم شده در تیرهای دارای ۳ طول وصله به اندازه‌های: ۲۴، ۳۴ و ۴۴ سانتی‌متر و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی ۰٪ و ۱۰٪ در ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک‌ها بررسی شد. هدف از انجام بررسی انجام شده، کاهش کمینه‌ی عرض ترک‌خوردگی به ازای افزودن الیاف فولادی در تیر بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی دارای وصله‌ی میلگرد کششی است. از آنجایی که ایجاد وصله‌ی میلگرد به دلیل افزایش میزان لغزش آرماتور در تیرهای بتنی باعث افزایش عرض ترک‌خوردگی می‌شود، در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است تا با افزودن الیاف فولادی دو سر خم شده، ضعف ذکر شده در افزایش عرض ترک‌خوردگی در تیرهای بتن مسلح کاهش داده شود. به منظور انجام بررسی، ۱۲ نمونه تیر آزمایشگاهی به ابعاد: عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر با درصدهای متفاوت از الیاف فولادی و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی ساخته شدند. نمونه‌ها تحت خمش چهارنقطه‌یی ارزیابی شدند. در آزمایش‌ها، منحنی بار- تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها، مسیر گسترش ترک‌خوردگی و تأثیر افزودن الیاف فولادی در ترک‌خوردگی نمونه‌ها تحت فشار و کشش غیرمستقیم بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد با افزودن الیاف فولادی در تیرهای ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به مقدار ۲٪ حجمی، می‌توان طول وصله‌ی میلگردها را به میزان ۴۰٪ کاهش داد.

واژگان کلیدی: الیاف فولادی، بتن الیافی، بارگذاری استاتیکی، ترک‌خوردگی، وصله‌ی میلگردهای کششی، سنگ‌دانه‌ی بازیافتی.

farokhpour.m@yahoo.com  
ghalehnovi@um.ac.ir  
karimipour.arash@um.ac.ir

## ۱. مقدمه

### ۱.۱. تاریخچه‌ی پژوهش‌ها

و با بیرون آمدن از داخل عضو است. طول مناسب وصله، زمانی تأمین می‌شود که میلگرد توانایی انتقال تنش را در طول وصله داشته باشد، تا در حد نهایی، امکان تسلیم میلگرد پیش از خروج از عضو فراهم شود. ناکافی بودن طول وصله‌ی میلگرد، افزون بر کاهش ظرفیت خمشی تیرها، سبب افزایش عرض ترک‌خوردگی و گسترش ترک نیز می‌شود. روابط مختلفی برای تعیین طول وصله‌ی میلگرد در آیین‌نامه‌ها و توسط پژوهش‌گران ارائه شده است. در مطالعه‌ی حاضر، طول وصله‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی طبق رابطه‌ی پیشنهادی اصفهانی و کیانوش (۲۰۰۲)<sup>[۱]</sup> که تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های مختلف گذشته داشته است، از طریق رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است:

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

علل برخی خرابی‌ها در تیرها و ستون‌ها، خوردگی میلگردها و کاهش سریع مقاومت خمشی است. ضعف بتن در مقابل کشش، سبب ترک‌خوردگی نمونه‌ی بتن مسلح می‌شود و امکان نفوذ مواد شیمیایی در اعضاء بتنی را افزایش می‌دهد. این امر می‌تواند سبب زنگ‌زدگی و خوردگی میلگردها شود. از طرف دیگر، برای اتصال اعضاء بتنی در بخش‌هایی از سازه، نیاز به استفاده از وصله‌ی میلگرد است. آنچه در وصله‌ی میلگرد حائز اهمیت است، تأمین طول مناسب آن‌ها قبل از جدا شدن از میلگردها

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۴/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۶/۲۰، پذیرش ۱۳۹۸/۷/۲۰

DOI:10.24200/J30.2019.52894.2513

که در آن،  $A_s$  و  $f_s$  به ترتیب مساحت میلگردهای طولی و تنش کششی میلگرد است. زمانی که میلگرد به تسلیم برسد، در رابطه‌ی ۱ از  $f_y$  به جای  $f_s$  استفاده می‌شود و همچنین:  $a = \frac{f_c + 0.5}{d_b + 1.75} \times \sqrt{2d_b}$  زمانی رابطه‌ی ۱ قابل قبول است که مقدار کافی خاموت در طول وصله تعبیه شود. برای جزئیات بیشتر به نوشتار اصفهانی و کیانوش<sup>[۱]</sup> مراجعه شود. از عوامل تأثیرگذار در 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 به‌طور کلی به دو دسته‌ی 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، شکل و اندازه‌های مختلفی دارند.<sup>[۲]</sup> استفاده از الیاف فولادی باعث کاهش عرض ترک‌خوردگی و بازتوزیع 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 ترک‌خوردگی باعث می‌شود تا عرض ترک دیرتر گسترش یابد. در اعضاء بتن مسلح، افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت خمشی و ضربه‌ی می‌شود. با افزایش درصد الیاف می‌توان مقاومت عضو بتن مسلح را بهبود بیشتری داد.<sup>[۳]</sup> علاوه بر افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن، الیاف فولادی نه فقط باعث کاهش عرض ترک‌خوردگی می‌شوند، بلکه سبب کاهش عرض ترک می‌شوند.<sup>[۵]</sup> در حالت بتن سفت شده، الیاف فولادی مانند پلی بین ترک‌های کوچک عمل می‌کنند و مانع از باز شدن آن‌ها می‌شوند. افزون بر این، در صورتی که الیاف فولادی به میزان بالای ۱٪ حجمی در بتن استفاده شود، تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت کششی بتن دارد.<sup>[۶]</sup> 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 تأخیر می‌اندازد. از طرف دیگر، در صورتی که الیاف فولادی به میزان کم در عضو بتنی استفاده شوند، تأثیر قابل توجهی در مقاومت کششی و خمشی عضو بتنی نخواهد داشت. از این رو، در صورتی که الیاف فولادی به میزان مناسبی در عضو بتنی استفاده شوند، به دلیل افزایش مقاومت کششی بتن، تأثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح دارند.<sup>[۷]</sup> در راستای اثر استفاده از سنگ‌دانه‌های باز یافتی در بتن و تأثیر آن‌ها در رفتار اعضاء بتنی، مطالعات متعددی در زمینه‌ی تحلیل عملکرد سازه‌های بتنی باز یافتی شده انجام شده است.<sup>[۸-۱۷]</sup> در سال ۲۰۱۸، چابکی و همکارانش<sup>[۱۸]</sup> به بررسی اثر افزودن الیاف فولادی در شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه باز یافتی بر روی ۲۷ نمونه‌ی تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی پرداختند و دریافته‌اند که افزودن الیاف فولادی سبب افزایش ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری تیرهای ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی طبیعی می‌شود و از کاهش شکل‌پذیری در نمونه‌ی دارای سنگ‌دانه‌ی باز یافتی جلوگیری می‌کند. در بررسی دیگری، چابکی و همکارانش<sup>[۱۹]</sup> (۲۰۱۹) به تأثیرگذاری افزودن الیاف فولادی در رفتار برشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی با فاصله‌ی خاموت مختلف پرداختند. طبق بررسی آن‌ها مشخص شد که شکست نمونه در تیرهای دارای سنگ‌دانه‌ی باز یافتی با فاصله‌ی خاموت بیشتر از مقدار مصاحبه شده توسط روابط آیین‌نامه‌ی، به صورت کامل برشی بوده است، که افزودن الیاف سبب شکست به صورت خمشی در نمونه‌های مذکور شده است. ژائو و ژانگ<sup>[۲۰]</sup> (۲۰۱۸)، نیز در بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی و دارای الیاف فولادی، ۵ مقدار مختلف الیاف

فولادی به نمونه‌ها افزودند و دریافته‌اند که افزودن الیاف فولادی به میزان قابل توجهی ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی را بهبود می‌دهد. در بررسی دیگری، تارک و همکارانش<sup>[۲۱]</sup> (۲۰۱۷)، در بررسی اثر افزودن خرده آجر به عنوان مصالح دورریز و باز یافتی به تیرهای بتن مسلح، ۲۴ نمونه تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی را ارزیابی کردند و دریافته‌اند که استفاده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی سبب کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌ها نمی‌شود. با وجود این، کاربرد مصالح باز یافتی در موارد عملی ساخت‌وساز و مهندسی عمران نیازمند مطالعاتی در مقیاس کامل تراست؛ مطالعاتی که به ارزیابی میزان واکنش بتن باز یافت شده به تغییر شکل بار بردار، تا به نتیجه‌ی مناسبی نسبت به طراحی سازه‌ی بتوان دست یافت. در این راستا، بررسی‌های مختلفی در رابطه با عملکرد خمشی بتن‌های سازه‌ی باز یافت شده انجام شده است.<sup>[۲۲-۲۴]</sup> با این حال، تعداد پژوهش‌های صورت گرفته درباره‌ی بتن‌هایی با درصد جابه‌جایی بالا، کافی نبوده و به علاوه، برخی نتیجه‌گیری‌های متناقض نیز در این زمینه شناسایی شده‌اند. از طرفی، برخی از پژوهش‌گران<sup>[۲۵]</sup> به این نتیجه رسیده‌اند که تیرهای بتنی ساخته شده از مصالح باز یافتی، انحراف بالاتر و نیز میزان ترک‌خوردگی پایین‌تر یا برابر با تیرهای بتنی معمول دارند؛ در حالی که برخی دیگر از پژوهش‌گران<sup>[۲۶-۲۸]</sup> و هیچ‌گونه تفاوت قابل توجهی از لحاظ عملکرد خمشی میان بتن‌های باز یافتی و معمول مشاهده نکرده‌اند.

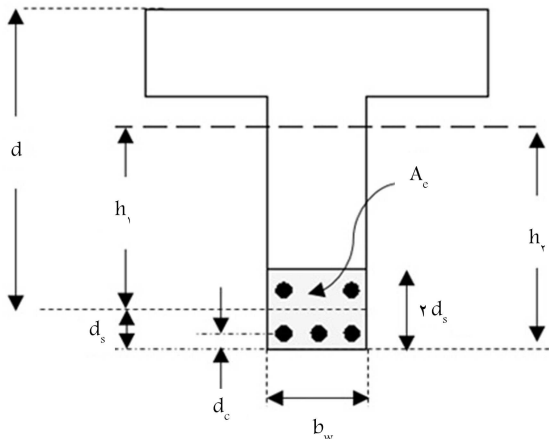
گاورلو و سینتی<sup>[۲۹]</sup> (۲۰۱۸)، نیز در بررسی اثر چسبندگی بین بتن و میلگرد در بتن‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی و اثر لغزش آرماتور، ۴۸ عدد تیر بتن مسلح در مقیاس آزمایشگاهی را بررسی کردند. نمونه‌ها دارای طول وصله‌ی میلگرد بودند و سنگ‌دانه‌ی باز یافتی با درصد جایگزینی مختلف در نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌ها تحت خمش چهار نقطه‌ی آزمایش شدند و نتیجه‌گیری شد که تفاوت قابل توجهی بین لغزش میلگرد در بتن ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی طبیعی و باز یافتی وجود ندارد. همچنین گوکسو و همکارانش<sup>[۳۰]</sup> (۲۰۱۶)، به تأثیر وصله‌ی میلگرد در رفتار اعضاء بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت پایین و متوسط تحت بار چرخه‌ی 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 به دلیل ایجاد وصله می‌شود.

امروزه با توجه به پیشرفت علوم و افزایش اهمیت حفظ محیط زیست، مهندسان در تلاش هستند که از مصالح دورریز به‌عنوان جایگزین در ساخت مصالح جدید استفاده کنند. بر اساس پیشینه‌ی تحقیق و علمی‌رغم شناسایی برخی از تفاوت‌ها، روش‌های آیین‌نامه‌ی در بتن‌های معمول را می‌توان جهت پیش‌بینی رفتار خمشی تیرهای ساخته شده از مصالح باز یافتی نیز به‌کار برد.<sup>[۳۱-۳۳]</sup> در همین راستا، افزایش درشت‌دانه‌های بتنی باز یافت شده به کاهش میزان سختی بتن منجر می‌شود،<sup>[۳۴]</sup> که با انحراف‌های افزایش‌یافته در تیرهای ساخته شده از بتن باز یافتی تطابق دارد. به‌طور کلی، می‌توان گفت همانند بتن‌های تقویت شده‌ی معمول، بتن‌های باز یافتی نیز می‌توانند نیازهای مرتبط با مقاومت و سطح اطمینان در ساختمان‌ها را برطرف سازند.<sup>[۳۵-۳۷]</sup> با وجود این، جهت تشویق به استفاده از مصالح باز یافتی برای ساخت بتن سازه‌ی، باید توانایی لازم برای طراحی اعضاء مختلف بتن تقویت شده با درشت‌دانه‌های باز یافتی با استفاده از روش‌های طراحی موجود لحاظ شود.<sup>[۳۸]</sup>

آزاد<sup>[۳۹]</sup> (۲۰۱۷)، نیز در بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی، ۱۵ عدد تیر بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی باز یافتی تحت خمش چهار نقطه‌ی را با هدف بررسی تأثیر افزایش درصد سنگ‌دانه‌ی باز یافتی

جدول ۱. پیشینه‌ی مجاز عرض ترک خوردگی بر اساس ACI - ۲۲۴R.

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



شکل ۱. نمایش متغیرهای به کار رفته در تعیین عرض ترک خوردگی خمشی بر اساس رابطه‌ی گرگلی - لوتر.<sup>[۳۶]</sup>

خنثی از مرکز سطح میلگردهای کششی  $(\frac{h_1}{h_r})$  است و  $f_s$  تنش در فولادهای کششی مقطع تا مرکز نزدیک‌ترین میلگرد کششی و  $A$  سطح کششی مؤثر بتن پیرامونی میلگرد کششی است، که از تقسیم سطح مقطع مؤثر بتن پیرامونی فولادهای کششی  $(A_c = 2d_s b_w)$  بر تعداد میلگردهای کششی  $(N)$  به دست می‌آید  $(A = \frac{A_c}{N})$ . متغیرهای مورد استفاده در رابطه‌ی ۲ در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

لازم به ذکر است که در جایگذاری کیفیت  $\beta_h$  در رابطه‌ی ۲ می‌توان به جای یک محاسبه‌ی دقیق‌تر، از مقدار ۱/۲ در تیرها و ۱/۳۵ در دال‌های یک‌طرفه استفاده کرد. همچنین منطقی خواهد بود که از مقدار  $f_y/6$  به جای  $f_s$  به جای یک محاسبه‌ی دقیق‌تر در تعیین تنش فولاد کششی تحت بارهای بدون ضریب استفاده شود. پیشینه‌ی عرض ترک خوردگی در یک عضو بتن آرمه تحت کشش مستقیم را نیز می‌توان بر اساس رابطه‌ی برومز - لوتر<sup>[۳۷]</sup> به صورت رابطه‌ی ۳ تعیین کرد:

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

با توجه به دستورالعمل ۲۰۰۴ - CSA - S4۷۴<sup>[۲۹]</sup> میانگین فاصله‌ی ترک به صورت رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$S_{m,CSA} = 2(C + 0.1S) + k_1 k_2 d_b h_{eff} f_b / A_{st} \quad (4)$$

که در آن،  $C, S, d_b$ ، به ترتیب: پوشش بتن، فاصله‌ی مرکز تا مرکز میلگرد (میلی‌متر)، عرض مقطع (میلی‌متر)، قطر میلگرد و مساحت فولاد کششی (میلی‌متر مربع) هستند. همچنین  $k_1$  ضریب مشارکت شرایط مرزی اتصال‌هاست، که برای فولاد ساده ۰/۴ و برای فولاد آج‌دار ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود.  $k_2$  ضریب کرنش است که برابر با  $\frac{2.0(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\epsilon_1}$  است، که در آن،  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  بیشترین و کمترین کرنش مؤثر در ناحیه‌ی مدفون هستند. همچنین  $h_{eff}$  ضخامت مؤثر ناحیه‌ی مدفون است.

در رفتار تیرهای بتن مسلح ارزیابی کردند و دریافتند که با افزایش درصد سنگ‌دانه‌ی بازافتی به میزان ۵٪، تأثیر قابل توجهی در پیشینه‌ی ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح اتفاق نمی‌افتد، در حالی که با افزایش بیشتر از ۵٪، ظرفیت خمشی نمونه کاهش می‌یابد.

بر این اساس، مطالعات منتشر شده‌ی اخیر<sup>[۳۳]</sup> جهت دست‌یابی به توافقی مناسب نسبت به عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح و افزایش نتایج مرتبط با بتن سازه‌ی ساخته شده از مصالح بازافتی، 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 درجه‌ی تقریب مشابه با بتن معمول منتهی خواهد شد. افزون بر این، برخی از پارامترهای بتن، مانند: سختی خمشی، ظرفیت مقاومت، یا رفتار ترک خوردگی باید با هدف طراحی ساختاری دقیق در نظر گرفته شوند. به دلیل بروز شرایطی در رابطه با قابلیت کارکرد معمول پس از ترک خوردگی، پارامترهای ذکر شده جهت طراحی صحیح ساختار بتن‌ها مورد نیاز هستند. ظرفیت مقاومت پس از ترک خوردگی 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 ترک خوردگی، بیشتر پژوهش‌گران به این نکته‌ی کلی اشاره داشته‌اند که بتن بازافتی، نشان‌دهنده‌ی رفتار بدتری نسبت به بتن معمول است.<sup>[۳۳]</sup> این امر احتمالاً به میزان سختی کمتر منتهی می‌شود، که بر این اساس، زمانی که درشت‌دانه‌های بازافتی در بخش‌های مختلف سازه‌ی به کار می‌روند، تأثیر بتن پس از ترک خوردگی کمتر است.<sup>[۲۶،۲۷]</sup> در همین راستا، انتظار می‌رود تغییرشکل بیشتر بتن بازافتی<sup>[۲۶-۲۷]</sup> به عملکردهای خمشی متفاوتی نسبت به تیرهای ساخته شده با سنگ‌دانه‌ی طبیعی منتهی شود. از این رو، هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی اثر افزودن الیاف فولادی در کاهش عرض ترک خوردگی در تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی بازافتی و دارای وصله‌ی میلگرد است. در تیرهای دارای وصله‌ی میلگرد کششی، کاهش مقاومت پیوستگی و لغزش میلگرد می‌تواند سبب افزایش ترک خوردگی و عرض ترک شود. با توجه به مسیر گسترش ترک خوردگی و عرض آن‌ها، الگوهای ترک خوردگی تعیین شده است. ورود مواد اسیدی در طی ترک خوردگی‌ها، 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.<sup>[۳۳]</sup> علاوه بر این، افزایش کرنش در میلگردهای طولی و کاهش مقاومت بتن سبب افزایش بیشتر لغزش میلگرد در بتن می‌شود و عرض ترک خوردگی‌ها افزایش می‌یابد.<sup>[۳۴]</sup>

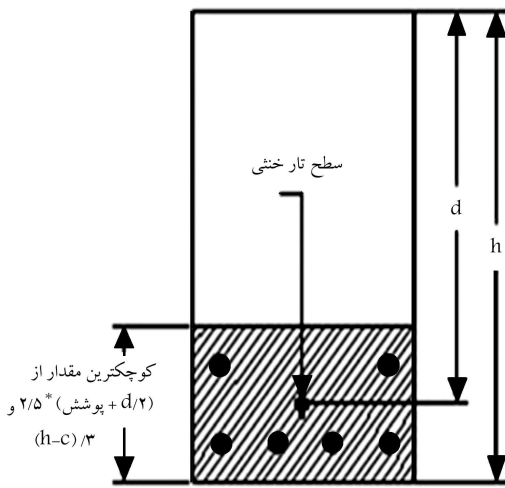
## ۲.۱. بررسی عرض ترک خوردگی از دیدگاه آیین‌نامه‌ی

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 آیین‌نامه‌ی ACI - ۲۲۴R، محدوده‌ی مجاز عرض ترک خوردگی در شرایط بهره‌برداری گوناگون بر اساس جدول ۱ است.<sup>[۳۵]</sup>

تعیین عرض ترک خوردگی دقیقاً ممکن نیست و به مسائل مختلفی وابسته است. روابط تجربی زیادی توسط برخی پژوهش‌گران برای تعیین عرض ترک ارائه شده است. در این میان، رابطه‌ی تجربی گرگلی - لوتر<sup>[۳۶]</sup> در تعیین عرض ترک خمشی، اعتبار بیشتری دارد. رابطه‌ی گرگلی - لوتر (۱۹۶۸)،<sup>[۳۶]</sup> عرض ترک خمشی ( $w$ ) را بر حسب میلی‌متر، به صورت رابطه‌ی ۲ تعیین می‌کند:

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

که در آن،  $\beta_h$  نسبت فاصله‌ی محور خنثی از دورترین تار کششی به فاصله‌ی تار



شکل ۴. مساحت مؤثر. [۳۹]

که در آن  $r$  ضریب همبستگی است و طبق رابطه  $\gamma$  محاسبه می‌شود:

$$W_{k,NS} = \gamma_r W_{m,NS}, W_{m,NS} = r w_{\varepsilon_1} S_{m,NS} \quad (6)$$

$$r = 1 - \frac{\beta}{\gamma_r \delta k_1} \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \geq 0.4 \quad (7)$$

که در آن،  $\varepsilon_1$  کرنش کششی بیرونی‌ترین سرفه‌ی میلگرد کششی است. لازم به ذکر است که توزیع تنش غیرمحوری با جهت کرنش اصلی میلگردهای طولی موازی است. همچنین  $\varepsilon_1 = \varepsilon_s = \sigma_s / E_s$ ، که در آن و  $E_s$  و  $S_m$  به ترتیب مدول کشسانی میلگرد اصلی و متوسط فاصله‌ی ترک خوردگی مطابق رابطه‌ی ۶ هستند.  $\beta$  ضریب شرایط محیطی است.

آیین‌نامه‌ی [۳۹]، CSA - S474 - 2004 متوسط عرض ترک خوردگی را مطابق رابطه‌ی ۸ تعیین می‌کند. مطابق آیین‌نامه‌ی اروپا، اولین پارامتر تأثیرگذار در عرض ترک خمشی پوشش بتن است. مطابق آیین‌نامه‌ی مذکور، متوسط فاصله‌ی عرض ترک خمشی مطابق رابطه‌ی ۸ تعیین می‌شود:

$$S_{m,EC2} = 2C + k_1 k_2 \frac{d_b A_{ct}}{4 A_{st}} \quad (8)$$

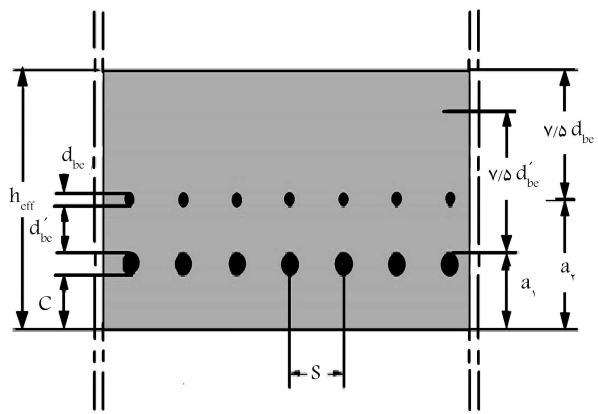
که در آن،  $C$  و  $d_b$  به ترتیب پوشش بتن و قطر میلگرد طولی بر حسب میلی‌متر هستند. علاوه بر این، نسبت مساحت مؤثر مقطع مسلح است و مطابق شکل ۴ محاسبه می‌شود.  $k_1$  برای میلگرد آج‌دار و معمولی به ترتیب برابر ۰/۸ و ۱/۶ است. همچنین  $k_2$  برای عضو تحت خمش برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. عرض ترک خوردگی ( $W_k$ ) به صورت رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$W_{k,EC2} = \beta_{EC2} W_{m,EC2}, W_{m,EC2} = S_{m,EC2} \xi \varepsilon_{s2} \quad (9)$$

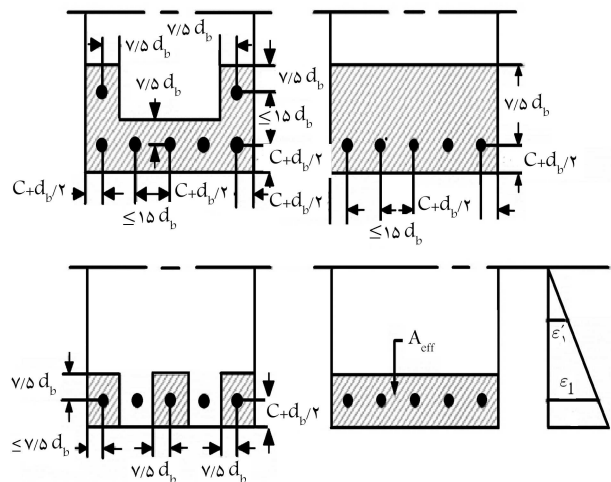
که در آن،  $W_{k,EC2}$  عرض ترک و  $S_{m,EC2}$  فاصله‌ی ترک است که مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود. افزون بر این،  $\xi$  ضریب بی‌بندی است که مقدار آن بین ۰ و ۱ است.  $\varepsilon_{s2}$  متوسط کرنش تحت ترکیب‌های بارگذاری و شامل شرایط محصورشدگی است. همچنین  $\beta_{EC2}$  متوسط نسبت ترک خوردگی برای طراحی است.

آیین‌نامه‌ی [۳۱]، CEB - FIP، رابطه‌ی متفاوتی را برای تعیین فاصله‌ی ترک ارائه می‌کند، که مطابق آن فاصله‌ی ترک می‌تواند مطابق رابطه‌ی ۱۰ تعیین شود:

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



شکل ۲. ضخامت ناحیه‌ی مدفون مطابق ۲۰۰۴ - S474 - CSA. [۳۹]



شکل ۳. محاسبه مساحت مؤثر برای تعیین فاصله‌ی ترک خمشی مطابق دستورالعمل [۳۸]، NS - 2473E

ضخامت ناحیه‌ی مدفون ( $d_{eff}$ ) برابر با بیشترین مقدار بین  $a_1 + \gamma/5 d_b$  و  $a_2 + \gamma/5 d_b$  است. افزون بر این،  $d_{eff}$  نباید از مساحت قسمت کشش یا نصف مساحت هاشورخورده‌ی نشان داده شده در شکل ۲ بزرگ‌تر باشد.

دستورالعمل [۳۸]، NS - 2473E همچنین رابطه‌ی مشابه دیگری را برای محاسبه‌ی فاصله‌ی میانگین ترک مطابق رابطه‌ی ۵ ارائه می‌دهد:

$$S_{m,NS} = 2(C + 0.1S) + k_1 k_2 d_b / \rho_t / NS \quad (5)$$

که در آن،  $C$  و  $S$  به ترتیب پوشش بتن و فاصله‌ی مرکز تا مرکز میلگرد (میلی‌متر) هستند. همچنین  $k_1$  ضریب محیطی روی خوردگی فولاد است، که برای فولاد آج‌دار برابر ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود.  $k_2$  ضریب کرنش است که برابر با  $\frac{2/25(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1}$  در نظر گرفته می‌شود، که در آن  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  بیشترین و کمترین کرنش مؤثر در ناحیه‌ی مدفون هستند. همچنین  $\rho_t NS$  نسبت مؤثر فولاد است، که برابر  $A_{st}/A_{ct}$  است و در آن  $A_{ct}$  مساحت مؤثر مقطع بتن مطابق شکل ۳ است. منطقه‌ی مذکور مساحت مؤثر فولاد در بتن کششی است.  $A_{st}$  نیز مساحت فولاد کششی است.

دستورالعمل‌های NS و CSA، [۳۸]، [۳۹] به ترتیب برای تعیین عرض ترک با اختلاف کمی در شیب کرنش و محاسبه‌ی مقطع فولاد مؤثر روابط مشابهی را ارائه می‌دهند. مطابق آیین‌نامه‌ی NS، فاصله‌ی ترک خوردگی با توجه به رابطه‌ی ۶ تعیین می‌شود،

مطابق آیین‌نامه‌ی ۰۱ - ACI 224R<sup>[۴۹]</sup>، در فاصله‌ی ترک خمشی، تنش میلگرد  $f_s$  در مقطع ترک‌خورده تحت بار به میزان  $0.67f_y$  محدود می‌شود. همچنین فاصله‌ی بین میلگرد کششی در لایه‌ی کششی بتن ( $S$ ) نباید از مقدار مجاز در رابطه‌ی ۱۵ تجاوز کند:

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

علاوه 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 شود و همچنین با انتقال مناسب تنش در سراسر میلگردهای کششی، باعث کاهش ترک‌خوردگی در تیرهای بتن مسلح شود.<sup>[۴۰]</sup> رسیدن اکسیژن به میلگرد سبب اکسایش آن‌ها و در نهایت سبب گسیختگی میلگرد ترک‌خورده می‌شود. از این رو، استفاده از پوشش اپوکسی بر روی میلگردها نیز می‌تواند سبب مقاومت در برابر اکسایش و خوردگی شود.<sup>[۴۱]</sup> افزودن الیاف فولادی بر بتن مسلح با افزایش مقاومت پیوستگی و کاهش لغزش میلگرد می‌تواند سبب کاهش عرض ترک‌خوردگی شود. در تیرهای دارای وصله، به دلیل ایجاد وصله، لغزش میلگرد بیشتر می‌شود؛ و همین امر سبب افزایش عرض ترک‌خوردگی در محل ایجاد وصله‌ی میلگرد کششی می‌شود. استفاده از الیاف فولادی باعث ایجاد پیوستگی بهتر بین میلگرد و بتن و نیز بهبود عملکرد آن‌ها در مجاورت هم می‌شود.<sup>[۵]</sup> از مزایای استفاده از الیاف فولادی می‌توان به افزایش پیوستگی بهتر میلگرد و بتن، افزایش مقاومت کششی، افزایش مقاومت در برابر بارهای ضربه‌یی و کاهش گسترش ترک‌ها اشاره کرد. در طی سال‌های ۱۹۶۰ الی ۱۹۷۰، ساخت الیاف فولادی به‌طور عمده آغاز شد. از ۴۰ سال پیش، به مرور زمان الیاف به‌عنوان مصالح افزودنی به بتن اضافه شدند.<sup>[۶]</sup> به منظور افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن و کاهش عرض ترک‌خوردگی، با افزودن درصد حجمی مختلف الیاف فولادی به نمونه‌ها، به تأثیر الیاف در عرض ترک‌خوردگی و نحوه‌ی گسترش امتداد ترک‌ها در اعضای دارای الیاف فولادی پرداخته شده است.

## ۲. مشخصات نمونه‌ها و فرایند انجام آزمایش

### ۲.۱. الیاف فولادی

در ساخت بتن الیافی از الیاف فولادی با دو انتهای خمیده به طول ۵ سانتی‌متر مطابق شکل ۶ استفاده شده است. ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی و کرنش گسیختگی الیاف به‌ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال، ۲۷۰ گیگاپاسکال و ۳٪ است.

### ۲.۲. سنگ‌دانه

در بررسی حاضر، سنگ‌دانه‌ی بازایافتی و طبیعی با درصد مختلف استفاده شده است. سنگ‌دانه‌های بازایافتی از تخریب نمای سنگ ساختمان قدیمی تهیه و با درصد جایگزینی ۰٪ و ۱۰٪ با سنگ‌دانه‌های طبیعی در نمونه‌ها جایگزین شدند. به منظور ارزیابی مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ‌دانه‌های بازایافتی و طبیعی از این آیین‌نامه‌ها استفاده شده است:

-- تعیین اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها: ASTM - C 136<sup>[۴۲]</sup>;

-- تعیین وزن مخصوص خیس: ASTM - C 29<sup>[۴۳]</sup>;

-- تعیین وزن مخصوص ظاهری: ASTM - C 127 و ASTM - C 128<sup>[۴۴]</sup>;

که در آن،  $l_{s,max}$  طول لغزش میلگردهای کششی است و به‌ترتیب برای ترک نهایی و اولین ترک از طریق رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$l_{s,max} = \frac{d_b}{3/6 \rho t_{CEB}} \quad (11)$$

$$l_{s,max} = \frac{\sigma_{sr2}}{2T_b} d_b \frac{1}{1 + \alpha \rho t_{CEB}} \quad (12)$$

که در آن‌ها،  $\sigma_{sr2}$  تنش کششی میلگرد در بخش ترک‌خورده بر حسب مگاپاسکال،  $d_b$  قطر میلگرد بر حسب میلی‌متر،  $T_b$  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 مؤثر میلگرد و برابر  $A_{st}/A_{ct}$  است.  $A_{st}$  و  $A_{ct}$  مساحت میلگرد کششی و مساحت مؤثر سطح مقطع عضو هستند و مطابق شکل ۴ محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، برای ساده سازی رابطه‌ی ۱۲، مقدار  $(1 + \alpha)$  برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود، که  $\alpha$  نسبت مدول کشسانی فولاد به بتن است ( $E_s/E_c$ ).

همچنین در آیین‌نامه‌ی CEB - FIP<sup>[۳۰]</sup>، رابطه‌ی متفاوتی برای تعیین فاصله‌ی ترک خمشی به‌صورت رابطه‌ی ۱۳ ارائه شده است:

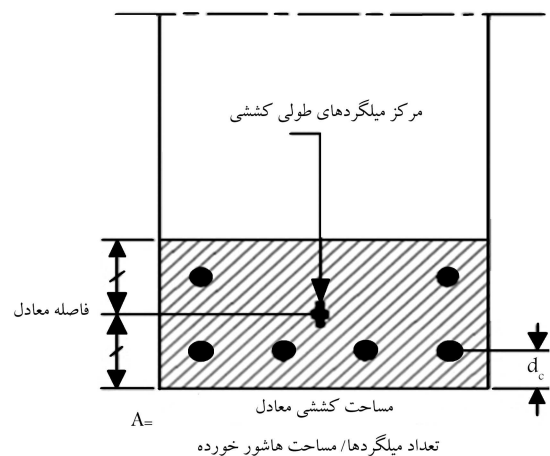
$$w_{k,CEB} = l_{s,max} (\varepsilon_{sr2} - \beta_{CEB} \varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{CS}) \quad (13)$$

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

مطابق آیین‌نامه‌ی ۰۱ - ACI 224R<sup>[۴۹]</sup> پیشینه‌ی فاصله‌ی ترک در تیر و دال با توجه به تحلیل استاتیکی تعیین می‌شود. مطابق تحلیل ذکر شده، فاصله‌ی ترک خمشی به کمک رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود:

$$W_{k,ACI} = 0.1 \sqrt{6} \beta_{ACI} f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-2} \quad (14)$$

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



شکل ۵. تعیین مشخصات هندسی مقطع طبق آیین‌نامه‌ی ۰۱ - ACI 224R<sup>[۴۹]</sup>

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگ دانه‌ها.

نوع سنگدانه	چگالی ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول بالک (gr/cm <sup>3</sup> )	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	۳,۹۹

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سنگ دانه‌های طبیعی و بازیافتی.

نوع سنگدانه		مشخصات شیمیایی
طبیعی	بازیافتی	
-	۷۲,۱	Ca(Cor)(%) ۱۰۰ R - ۲S
-	۲۷,۹	SiO <sub>۲</sub> (%)
۱۰۰	-	CaMg(Cor) <sub>۲</sub> (%)
-	-	CaMg(Cor)(%)
۱۰۰	۱۰۰	مشخصات کلی پراش (%)
۱۸,۵۸	۲۲,۲۳	میزان بازتابش (%)
۸۱,۴۲	۷۷,۷۷	پیک بازتابش (%)
۵۳,۱۵	۱۶,۰۸	بیشینه‌ی مقدار انتخاب شده (%)
-	۱۱,۱۰	بیشینه‌ی مساحت فاز A (کلسیت کلسیم کربنات) (%)
-	۴,۹۹	بیشینه‌ی مساحت فاز B (اکسید سیلیکن) (%)
۵۳,۱۵	-	بیشینه‌ی مساحت فاز A کربنات کلسیم منیزیم (%)



ب) بازیافتی.

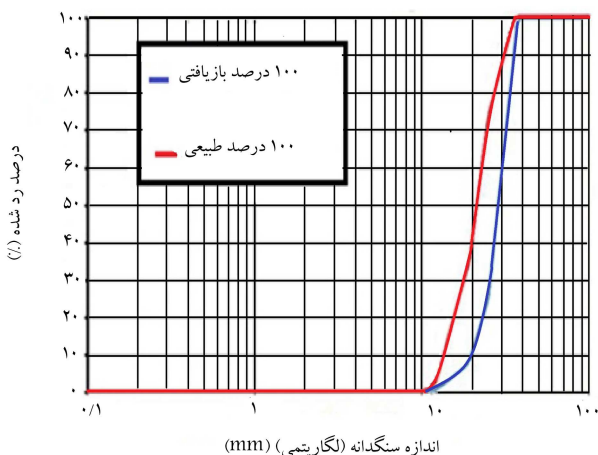


الف) طبیعی؛

شکل ۷. سنگ دانه‌های استفاده شده.



شکل ۶. الیاف فولادی مصرفی.



شکل ۸. منحنی دانه‌بندی سنگ دانه‌ها.

-- تعیین مدول بالک: ASTM - C۱۲۷ - ۸۸ و ASTM - C۱۲۸ - ۸۸. [۴۵]

نمونه‌یی از سنگ دانه‌های بازیافتی و طبیعی مورد استفاده در شکل ۷ نشان داده شده است. علاوه بر این، منحنی دانه‌بندی سنگ دانه‌های استفاده شده در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده جهت تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ دانه‌ها، نتایج به دست آمده به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. مطابق جدول ۳، سنگ دانه‌های بازیافتی انتخاب شده از ترکیب‌های شیمیایی به سنگ دانه‌های طبیعی، نزدیک هستند. این موضوع سبب می‌شود تا بتوان مقایسه‌یی که بین نمونه‌های ساخته شده از سنگ دانه‌ی بازیافتی با نمونه‌ی ساخته شده از سنگ دانه‌ی طبیعی انجام می‌شود، را قابل استناد کرد و از تأثیر مشخصات شیمیایی در رفتار نمونه‌ها صرف نظر کرد. افزون بر این، مشخصات اخیر در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، که طبق آن می‌توان از آثار مشخصات شیمیایی سنگ دانه‌ها در رفتار نمونه‌ها صرف نظر کرد. این تذکر لازم است که مشخصات

جدول ۴. نتایج آزمایش میلگردها.

قطر میلگرد (میلی متر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش تسلیم (%)	کرنش نهایی (%)	(مدول کشسانی) (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

#### ۴.۲. بتن

بتن استفاده شده در بررسی حاضر از ترکیب سیمان، شن، ماسه و آب تهیه شده است. الیاف فولادی با درصد حجمی ۰/۲٪ و ۰/۱٪ به نمونه‌ها افزوده شدند. سپس فوق روان‌کننده تا توزیع یکنواخت الیاف به مخلوط اضافه شد. همچنین سنگ‌دانه‌ی بازیافتی با درصد جایگزینی ۰/۱٪ و ۱۰/۰٪ به مخلوط بتن اضافه شد. طرح اختلاط بتن‌های استفاده شده در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل نزدیک بودن مشخصات سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی، نسبت آب به سیمان برای تمام ترکیب‌ها برابر ۰/۴۱ به دست آمد. به منظور تعیین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها، از هر نمونه‌ی طرح اختلاط، ۶ نمونه‌ی استوانه‌یی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌ی مورد آزمایش زیر جک هیدرولیکی مطابق آیین‌نامه‌های ۱ - BS - EN - ۱۲۳۹۰ - ۲، ۲ - BS - EN - ۱۲۳۹۰ - ۲ و ۸ - ASTM - C۲۹۳ - ۰۸<sup>[۲۶-۵۰]</sup> نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است، که مطابق آن، نتایج مربوط به مقاومت کششی و فشاری نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک است و می‌توان از آثار مقاومت فشاری و کششی در رفتار نمونه‌ها صرف‌نظر کرد.

در جدول‌های ۵ و ۶،  $S$  و  $R$  به ترتیب بیان‌گر درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و الیاف فولادی هستند.

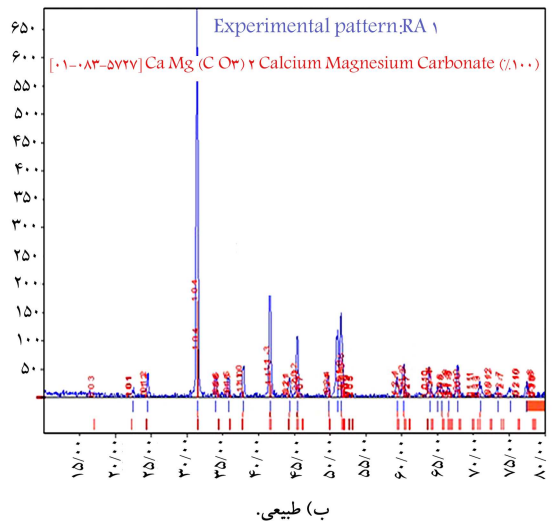
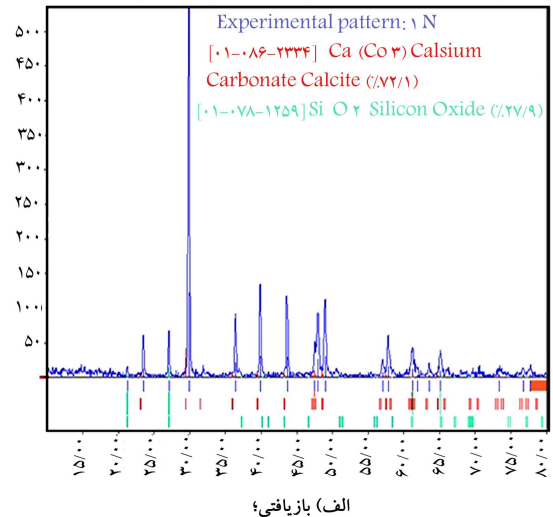
#### ۵.۲. مشخصات هندسی و میلگردگذاری نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، ۱۲ عدد نمونه‌ی تیر بتن مسلح به ابعاد: ارتفاع مقطع ۲۰۰، عرض مقطع ۱۵۰ و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر و دارای درصد حجمی متفاوتی از الیاف فولادی ساخته شدند و تحت بارگذاری ۴ نقطه‌یی استاتیکی قرار گرفتند. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی در شکل ۱۰ و جدول ۷ ارائه شده‌اند.

در جدول ۷،  $l_d$  طول وصله‌ی محاسباتی است که از طریق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. مساحت میلگردهای فشاری و کششی در نمونه‌ها به ترتیب ۱۵۷ و ۶۲۸ میلی‌متر مربع است. فاصله‌ی مرکز نقل میلگردهای کششی و فشاری از دورترین تارهای فشاری مقطع، به ترتیب برابر با ۱۶۵ و ۳۰ میلی‌متر است و طول وصله‌ی کششی از طریق رابطه‌ی ۱، به میزان ۴۳۰ میلی‌متر محاسبه شده است؛ که در نمونه‌هایی که طول وصله‌ی آن‌ها برابر  $l_d/8$  کاهش داده شده است، معادل ۳۴۰ میلی‌متر و نمونه‌هایی که طول وصله‌ی آن‌ها برابر  $l_d/6$  کاهش داده شده است، معادل ۲۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین در بعضی نمونه‌ها، سنگ‌دانه‌ی بازیافتی کاملاً جایگزین درشت‌دانه‌ها شده است.

#### ۳. دستگاه انجام آزمایش

نمونه‌های تهیه شده بعد از ۲۸ روز در آزمایشگاه دینامیک سازه‌ی دانشگاه فردوسی مشهد تحت خمش ۴ نقطه‌یی قرار داده شدند. فاصله‌ی بین نقطه‌های بارگذاری



شکل ۹. الگوی اشعه‌ی ایکس سنگ‌دانه‌ها.

شیمیایی سنگ‌دانه‌ها با انجام آزمایش اشعه‌ی ایکس به دست آمده و در شکل ۹ نشان داده شده است.

#### ۳.۲. میلگرد فولادی

در ساخت تیرهای بتن مسلح از میلگردهایی به قطرهای ۲۰، ۱۰ و ۸ میلی‌متر به ترتیب برای میلگرد کششی، فشاری و برشی استفاده شد. لازم به ذکر است که در تمام نمونه‌ها، آرایش میلگردها ثابت است. نتایج به دست آمده از آزمایش کششی مستقیم میلگردها در جدول ۴ ارائه شده است.



جدول ۵. طرح اختلاط بتن.

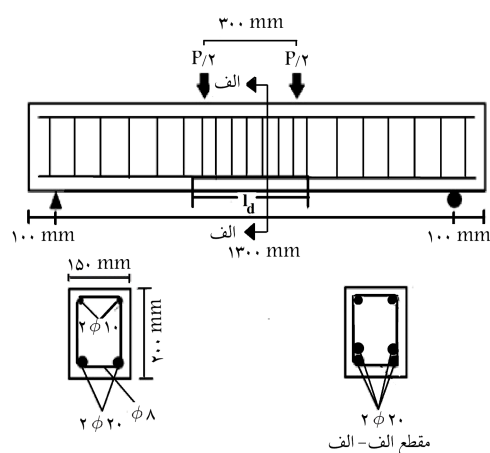
نمونه	آب (kg/m <sup>۳</sup> )	سیمان (kg/m <sup>۳</sup> )	الیاف فولادی (kg/m <sup>۳</sup> )	درشت دانه‌ی بازیافتی (kg/m <sup>۳</sup> )	درشت دانه‌ی طبیعی (kg/m <sup>۳</sup> )	ریزدانه‌ی طبیعی (kg/m <sup>۳</sup> )
°R - °S	۱۶۵	۴۰۰	۰	۰	۸۴۰	۹۵۰
۱۰°R - °S	۱۶۵	۴۰۰	۰	۸۴۰	۰	۹۵۰
°R - ۲S	۱۶۵	۴۰۰	۱۵۶	۰	۶۸۵	۹۵۰
۱۰°R - ۲S	۱۶۵	۴۰۰	۱۵۶	۶۸۵	۰	۹۵۰

جدول ۶. مقاومت کششی و فشاری نمونه.

نمونه	متوسط مقاومت کششی (مگاپاسکال)	انحراف از میانگین مقاومت کششی	متوسط مقاومت کششی (مگاپاسکال)	انحراف از میانگین مقاومت فشاری
°R - °S	۴٫۸۸	۰٫۲۷	۳۸٫۵	۱٫۱۱
۱۰°R - °S	۵٫۱۴	۰٫۱۹	۳۷٫۲	۱٫۷۵
°R - ۲S	۶٫۱۱	۰٫۲۷	۳۷٫۰	۱٫۴۸
۱۰°R - ۲S	۶٫۰۹	۰٫۲۳	۳۶٫۷	۰٫۸۸



شکل ۱۱. دستگاه بارگذاری و نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها.



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

۳۰۰ میلی‌متر بود. بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی و بارگذاری تا زمان تسلیم نمونه‌ها انجام شدند. تغییرشکل تیر در هر مرحله به کمک LVDT قرارگرفته در وسط تیر اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۱، نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۷. نام‌گذاری و مشخصات اصلی نمونه‌های آزمایش شده.

نام نمونه	(%)	سنگ‌دانه‌ی بازیافتی الیاف فولادی طول وصله (%)	(mm)
°R - °S - 1d	۰	۰	۴۳۰
°R - °S - ۰٫۸1d	۰	۰	۳۴۰
°R - °S - ۰٫۶1d	۰	۰	۲۶۰
۱۰°R - °S - 1d	۱۰۰	۰	۴۳۰
۱۰°R - °S - ۰٫۸1d	۱۰۰	۰	۳۴۰
۱۰°R - °S - ۰٫۶1d	۱۰۰	۰	۲۶۰
°R - ۲S - 1d	۰	۲	۴۳۰
°R - ۲S - ۰٫۸1d	۰	۲	۳۴۰
°R - ۲S - ۰٫۶1d	۰	۲	۲۶۰
۱۰°R - ۲S - 1d	۱۰۰	۲	۴۳۰
۱۰°R - ۲S - ۰٫۸1d	۱۰۰	۲	۳۴۰
۱۰°R - ۲S - ۰٫۶1d	۱۰۰	۲	۲۶۰

#### ۴. بررسی نتایج

در پژوهش حاضر، ۱۲ نمونه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی با درصدهای جایگزینی ۰٪ و ۱۰٪ ساخته شده است. به منظور افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن، الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰٪ و ۲٪ به نمونه‌ها افزوده شدند. بار محاسباتی، بار کل جک است. بارگذاری تا لحظه‌ی نهایی گسیختگی تیر افزایش داده شد و به منظور بررسی اثر لغزش میلگرد و ظرفیت نمونه‌ها، منحنی بار - تغییرمکان نمونه‌ها به دست آمد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، کاهش طول وصله‌ی میلگرد در نمونه‌های دارای سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی سبب کاهش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح می‌شود. علت این امر افزایش لغزش بین میلگرد و بتن به دلیل قطع میلگرد در



با افزایش بار ترک خوردگی ها در وسط دهانه و در ناحیه ی بیشینه ی لنگر خمشی آغاز شد. با افزایش بار توأم با گسترش امتداد ترک ها در وسط دهانه، ترک خوردگی به شکل مورب و از نزدیکی تکیه گاه آغاز شد. با افزایش مجدد بار اعمالی، با گسترش امتداد ترک خوردگی تا نزدیک تار خشی مقطع و افزایش ترک خوردگی های مورب، نمونه گسیخته شد. در دو نمونه  $R - S - 0.78 l_d$  و  $R - S - 0.6 l_d$  شکل های (۱۴ - ب و ۱۴ - پ)، به دلیل ناکافی بودن طول وصله، ترک خوردگی ها بیشتر در وسط دهانه و در محل جدا شدگی وصله اتفاق افتاده است؛ که دلیل آن بیشتر بودن لغزش میلگرد در وسط دهانه و انتقال تنش بیشتری به بتن است. با افزایش لغزش میلگردهای کششی عرض ترک ها افزایش بیشتری پیدا کرده و تمرکز ترک خوردگی در وسط دهانه ی تیر و در ناحیه با بیشترین لنگر خمشی و وصله اتفاق افتاده است. در دو نمونه ی مذکور نسبت به نمونه ی اول با طول وصله ی کامل، با افزایش بار امتداد ترک ها افزایش بیشتری یافته و تا دورترین تارهای فشاری مقطع امتداد پیدا کرده و تیر به صورت سریع و ناگهانی گسیخته شده است.

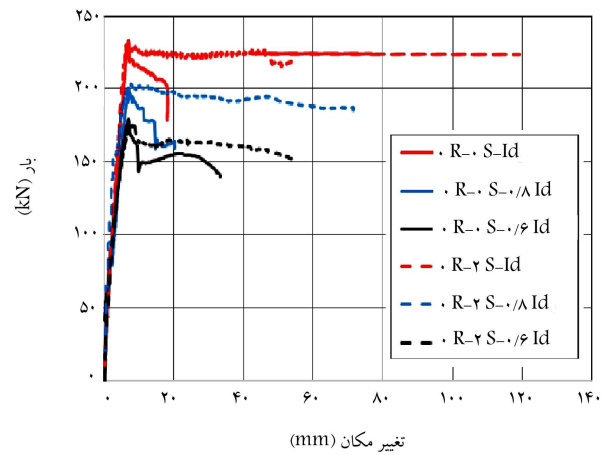
مطابق شکل های ۱۴ - ت، ۱۴ - ث و ۱۴ - ج، با جایگزین کردن سنگ دانه ی باز یافتی، ترک ها گسترش بیشتری پیدا کرده و عرض ترک ها کاهش یافته است (در مقایسه با نمونه ی ساخته شده از سنگ دانه ی طبیعی). در نمونه های اشاره شده با کاهش طول وصله، ترک ها از حالت مورب در نزدیکی تکیه گاه ها به وسط دهانه ی تیر و در محل بیشترین لنگر خمشی و وصله ی میلگرد معطوف شده اند. با افزودن الیاف فولادی به دلیل 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 ترک ها به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. مطابق شکل های ۱۴ - ج، ۱۴ - خ و ۱۴ - د، با افزودن الیاف فولادی، امتداد ترک ها کاهش و ترک خوردگی تا نزدیکی تار خشی امتداد پیدا کرده و نمونه با تغییر شکل بیشتری گسیخته شده است. مطابق شکل های اخیر، تفاوت قابل توجهی بین بروز ترک خوردگی در نمونه با طول وصله ی کامل و کاهش یافته وجود ندارد. با توجه به شکل های ۱۴ - ذ، ۱۴ - ر و ۱۴ - ز، افزودن الیاف فولادی به نمونه ی ساخته شده از سنگ دانه ی باز یافتی سبب افزایش تعداد ترک خوردگی می شود. این در حالی است که امتداد مسیر ترک ها کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. علاوه بر این، عرض ترک خوردگی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده و نمونه با عرض ترک کمتری گسیخته شده است. عرض ترک خوردگی با توجه به میزان بار به کمک خط کش مدرج اندازه گیری شد. در شکل ۱۵، عرض ترک خوردگی در دو لحظه ی وقوع اولین ترک و شکست نمونه نشان داده شده است. علاوه بر این، نتایج به دست آمده از انجام آزمایش ها با روابط ارائه شده مقایسه و در جدول ۸ ارائه شده است.

طبق جدول ۸، ترک خوردگی در نمونه ها بیشتر از نتایج به دست آمده توسط روابط است و این روابط باید به میزان قابل توجهی اصلاح شوند. از این رو، با توجه به نتایج به دست آمده، رابطه ی دو ضابطه ی تقریبی در دو حالت استفاده از الیاف فولادی و بدون الیاف فولادی به دست آمده و مطابق رابطه های ۱۶ - الف و ۱۶ - ب، با توجه به در نظر گرفتن اثر الیاف فولادی پیشنهاد شده است.

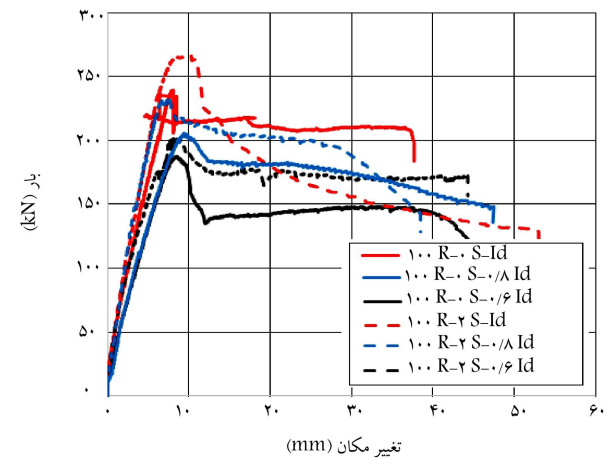
$$w_{max} = f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-4} \quad (۱۶ - الف) \text{ نمونه ی فاقد الیاف فولادی}$$

$$w_{max} = 4/66 f_s \sqrt{d_c A} \times 10^{-5} \quad (۱۶ - ب) \text{ نمونه دارای الیاف فولادی}$$

علاوه بر این، در شکل های ۱۶ الی ۱۸، عرض ترک خوردگی با توجه به افزایش بار برای نمونه ها با در نظر گرفتن طول وصله، درصد جایگزینی سنگ دانه و الیاف فولادی مشخص شده است. عرض ترک خوردگی ها در هر نمونه در طول بارگذاری به کمک کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه گیری شد. مطابق شکل ۱۶،



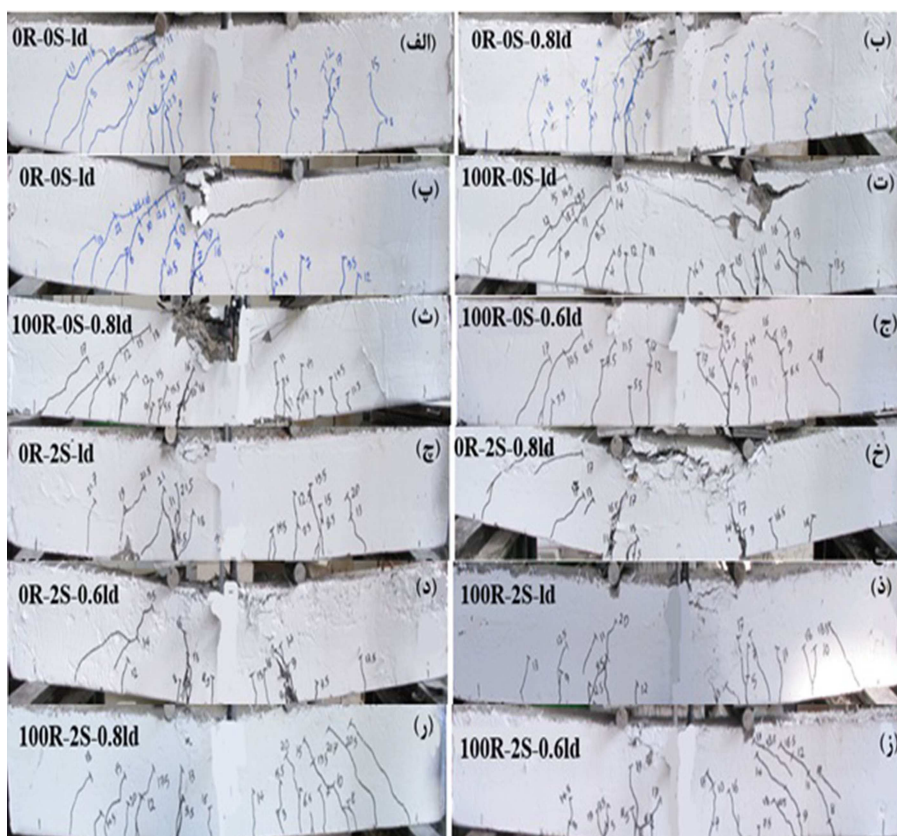
شکل ۱۲. منحنی بار - تغییر مکان نمونه ی فاقد سنگ دانه ی باز یافتی.



شکل ۱۳. منحنی بار - تغییر مکان نمونه ی دارای سنگ دانه ی باز یافتی.

وسط دهانه ی نمونه است. کاهش ظرفیت خمشی و افزایش لغزش بین میلگرد و بتن سبب افزایش ترک خوردگی و افزایش عرض ترک در بتن می شود. در مقایسه ی شکل های ۱۲ و ۱۳، با افزودن سنگ دانه ی باز یافتی، ظرفیت خمشی تغییر قابل توجهی نکرده است. این موضوع در حالی است که افزودن سنگ دانه ی باز یافتی سبب افزایش قابل توجه تغییر مکان نمونه شده و تقریباً به میزان ۱/۷ برابر تغییر مکان نسبت به نمونه ی ساخته شده از سنگ دانه ی طبیعی افزایش یافته است. از طرف دیگر، در هر دو نمونه ی ساخته شده از سنگ دانه ی باز یافتی و طبیعی، افزودن الیاف فولادی تأثیر به سزایی در بیشینه ی تغییر مکان نمونه داشته است، که این امر به دلیل افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن بوده است. این موضوع در حالی است که مطابق شکل های ۱۲ و ۱۳، استفاده ی هم زمان الیاف فولادی و سنگ دانه ی باز یافتی تأثیر قابل توجهی در بیشینه ی ظرفیت باربری نمونه داشته است. با این حال، بیشینه ی تغییر مکان نمونه به میزان قابل ملاحظه یی در مقایسه با زمانی که الیاف فولادی و سنگ دانه ی باز یافتی به تنهایی استفاده می شود، کاهش پیدا کرده است. با توجه به منحنی های بار - تغییر مکان، ترک خوردگی و مسیر گسترش ترک ها نیز در شکل ۱۴ مشاهده می شود.

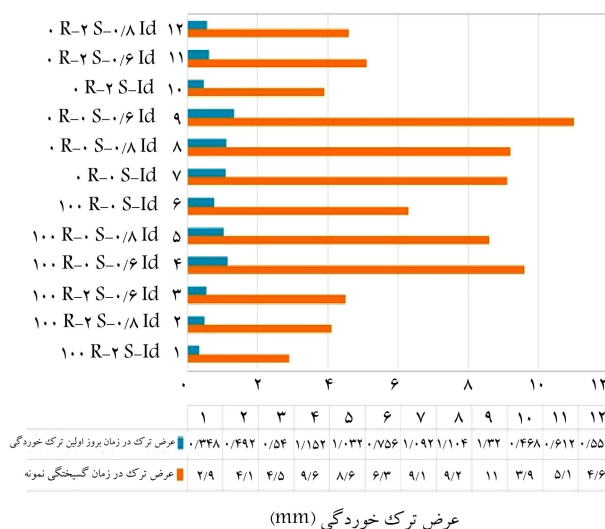
مطابق شکل ۱۴ - الف، در نمونه ی  $R - S - l_d$  به دلیل کافی بودن طول وصله، وصله ها به مانند میلگرد یک پارچه عمل کرده و به دلیل توزیع تنش در سراسر میلگرد کششی، ترک خوردگی در تمام طول تیر اتفاق افتاده است. در نمونه ی اخیر،



شکل ۱۴. شکست نمونه‌ها و مسیر گسترش ترک خوردگی در نمونه‌ها تحت بار استاتیکی.

با توجه به اثرگذاری سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و الیاف فولادی در کاهش عرض ترک خوردگی، نتایج به دست آمده از برنامه‌ی آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها به منظور پیش‌بینی عرض ترک خمشی در تیرهای بتن مسلح ارزیابی و مقایسه شده است (شکل ۱۹).

مطابق شکل ۱۹، در نمونه‌ی ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی طبیعی و فاقد الیاف فولادی، آیین‌نامه‌های ACI، NS، EuroCode2 و CSA عرض ترک خمشی را برای هر سه طول وصله به صورت قابل قبول و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند. علاوه بر این، در حالتی که نمونه از جایگزینی  $10^\circ$  سنگ‌دانه‌ی بازیافتی تهیه شده است، آیین‌نامه‌های ACI، NS، EuroCode2 و CSA در حالتی که طول وصله کاهش یافته است، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند؛ در حالی که در نمونه با طول وصله‌ی میلگرد کامل، نتایج ارائه شده توسط آیین‌نامه‌های ACI و CEB – FIP قابل قبول‌تر است. از طرف دیگر، زمانی که الیاف فولادی و یا ترکیب الیاف فولادی و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در نمونه استفاده شود، فقط نتایج به دست آمده از آیین‌نامه‌ی CEB – FIP و فقط برای حالت‌های تیر بتن مسلح با وصله‌ی کاهش داده شده قابل قبول است و در نمونه با طول وصله‌ی کامل، هیچ‌کدام از آیین‌نامه‌ها عرض ترک خمشی را به درستی پیش‌بینی نمی‌کنند. علت این موضوع را می‌توان این‌طور بیان کرد که آیین‌نامه‌های مطرح شده، اثر لغزش آرماتور در افزایش عرض ترک و نیز تأثیر افزودن مصالح افزودنی نظیر الیاف فولادی در کاهش عرض ترک را مد نظر قرار نمی‌دهند. همچنین، روابط ذکر شده تأثیر استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی را مد نظر قرار ندادند. این موضوع در حالی است که سنگ‌دانه‌های بازیافتی، سطوح شکسته‌ی بیشتری نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی

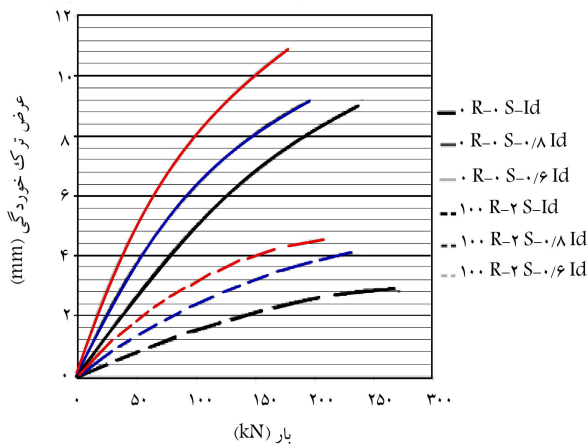


شکل ۱۵. پیش‌بینی عرض ترک خوردگی نمونه‌ها در دو لحظه‌ی وقوع اولین ترک و شکست نمونه.

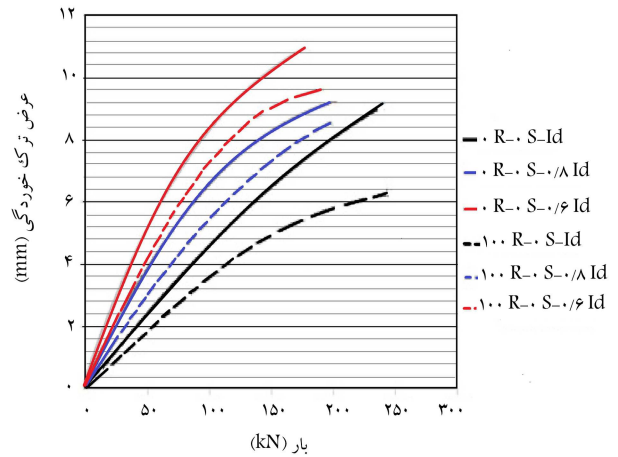
افزودن سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش عرض ترک خوردگی داشته و به طور متوسط  $22\%$  عرض ترک خوردگی را کاهش داده است. افزودن الیاف فولادی در کاهش عرض ترک خوردگی بسیار مؤثر بوده و عرض ترک خوردگی را به صورت متوسط در نمونه به میزان  $67\%$  کاهش داده است (شکل ۱۷). از طرف دیگر، استفاده‌ی توأم سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و الیاف فولادی مطابق آنچه در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، سبب کاهش عرض ترک خوردگی به میزان  $70\%$  شده است.

جدول ۸. مقایسه‌ی عرض ترک خمشی.

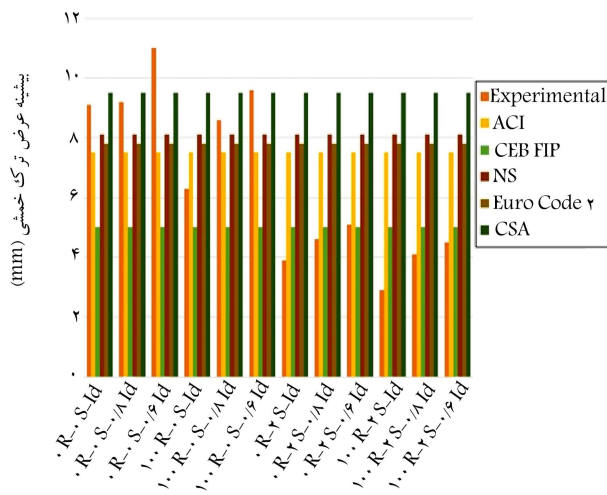
بیشینه‌ی عرض ترک خوردگی (میلی متر)	نمونه	بیشینه‌ی عرض ترک خوردگی (میلی متر)	نمونه
۳٫۹	$0R - 2S - l_d$	۹٫۱	$0R - 0S - l_d$
۴٫۶	$0R - 2S - 0/8l_d$	۹٫۲	$0R - 0S - 0/8l_d$
۵٫۱	$0R - 2S - 0/6l_d$	۱۱٫۰	$0R - 0S - 0/6l_d$
۲٫۹	$100R - 2S - l_d$	۶٫۳	$100R - 0S - l_d$
۴٫۱	$100R - 2S - 0/8l_d$	۸٫۶	$100R - 0S - 0/8l_d$
۴٫۵	$100R - 2S - 0/6l_d$	۹٫۶	$100R - 0S - 0/6l_d$
۴٫۰		مقدار مجاز ACI [۳]	
۱٫۲		گرگالی - لوتز [۴]	
۱٫۳		برومز - لوتز [۵]	



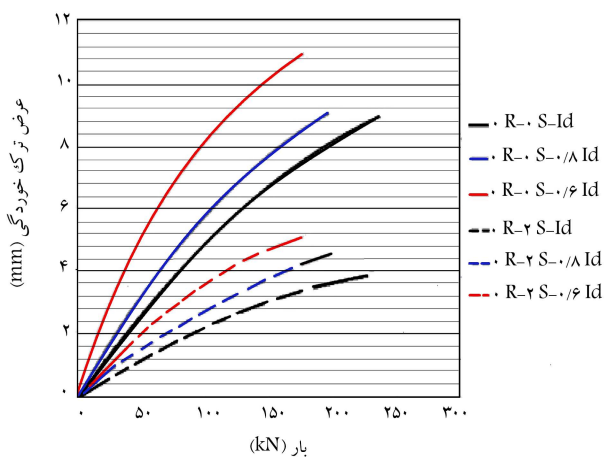
شکل ۱۸. بار متناظر با بروز ترک خوردگی در نمونه‌ی دارای سنگ‌دانه‌ی طبیعی، بازتابی و الیاف فولادی.



شکل ۱۶. بار متناظر با بروز ترک خوردگی در نمونه‌ی دارای سنگ‌دانه‌ی بازتابی و طبیعی.



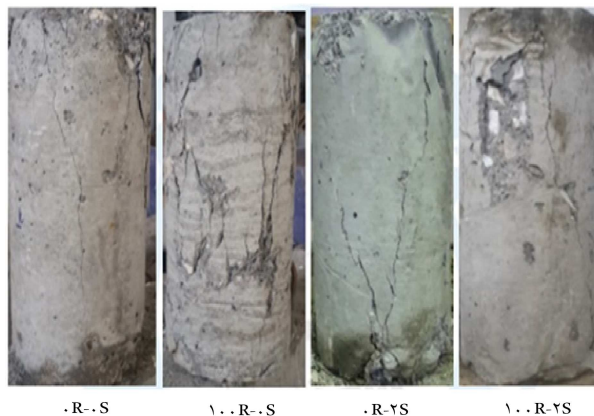
شکل ۱۹. مقایسه‌ی عرض ترک خوردگی در لحظه‌ی گسیختگی با نتایج آزمایش.



شکل ۱۷. بار متناظر با بروز ترک خوردگی در نمونه‌ی دارای سنگ‌دانه‌ی طبیعی و الیاف فولادی.

سطوح شکسته در قیاس با سنگ‌دانه‌ی طبیعی، به خمیر سیمان بهتر آغشته می‌شود و از فروپاشیدگی کامل نمونه جلوگیری به عمل می‌آید.

علاوه بر رفتار فشاری، رفتار کششی نمونه‌های بتنی دارای سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و الیاف فولادی نیز بررسی شده است. به منظور بررسی اخیر، شکست نمونه‌ها تحت آزمایش برزیلی (کشش غیرمستقیم) بررسی شد (شکل ۲۱)، که مطابق آن در نمونه‌ی فاقد الیاف فولادی، نمونه تحت کشش غیرمستقیم به دو قسمت تقسیم می‌شود. این در حالی است که افزودن الیاف فولادی از شکست نمونه به دو قسمت جلوگیری می‌کند و نمونه با ایجاد لهیدگی (تغییر شکل بدون فروپاشی و شکست) مطابق شکل ۲۱ تسلیم می‌شود. همچنین استفاده از سنگ‌دانه‌ی 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 سنگ‌دانه‌ی بازیافتی باعث کاهش نامحسوس مقاومت کششی در نمونه‌ها شده است.

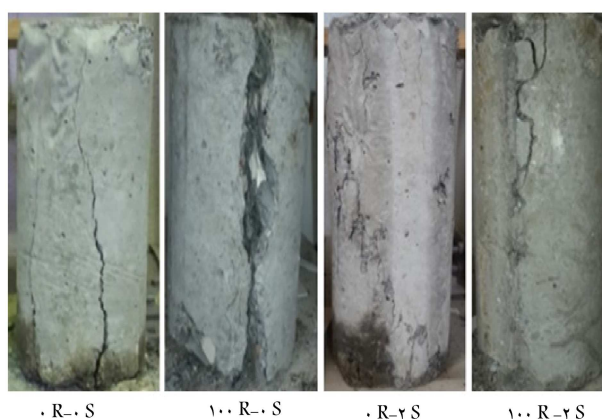


شکل ۲۰. اثر افزودن الیاف فولادی و درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در رفتار فشاری بتن.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر الیاف فولادی در ترک‌خوردگی و مسیر گسترش ترک در تیر بتن مسلح ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی دارای وصله‌ی میلگرد کششی تحت بارگذاری استاتیکی بررسی شده است، که شامل ۱۲ نمونه تیر بتن مسلح بوده است. منحنی بار - تغییر مکان، عرض ترک‌خوردگی‌ها، مسیر گسترش ترک، افزایش عرض ترک‌خوردگی متناظر با افزایش بار و تأثیر افزودن الیاف فولادی در ترک‌خوردگی و گسیختگی بتن مسلح شده بررسی شده است. علاوه بر این، نتایج به دست آمده با روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های CEB - FIP, NS, CSA, ACI و EuroCode ۲ مقایسه شده است. بر اساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایش‌های اخیر، این نتایج به دست آمده است:

۱. افزودن الیاف فولادی سبب کاهش لغزش میلگردهای کششی در محل وصله می‌شود و عرض ترک‌خوردگی‌ها را کاهش می‌دهد. با افزودن الیاف فولادی به میزان ۲٪ حجمی در نمونه‌ی دارای وصله‌ی کاهش یافته‌ی  $0.81d$  /  $0.61d$  و افزودن الیاف فولادی به میزان ۲٪ حجمی و ۱۰٪ جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی می‌توان به ترتیب به میزان کمینه‌ی ۶۷٪ و ۷۰٪، عرض ترک‌خوردگی را کاهش داد.
۲. افزودن الیاف فولادی به دلیل افزایش مقاومت پیوستگی باعث کاهش توزیع ترک در سراسر عضو و نیز تمرکز ترک‌خوردگی‌ها در میانه‌ی دهانه‌ی تیر و در محل وصله می‌شود.
۳. کاهش طول وصله سبب کاهش ظرفیت خمشی تیر بتن مسلح می‌شود. با افزودن سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در مقایسه با نمونه‌ی دارای سنگ‌دانه‌ی طبیعی، ظرفیت تغییر قابل توجهی نکرده است، با این تفاوت که تغییر مکان نمونه به میزان قابل توجهی و تقریباً به میزان  $1/5$  برابر تغییر مکان نمونه‌ی ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی طبیعی افزایش یافته است.
۴. افزودن الیاف فولادی تأثیر به‌سزایی در بیشینه‌ی تغییر مکان نمونه داشته است، که این امر به دلیل افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن بوده است. از طرفی دیگر، استفاده‌ی هم‌زمان الیاف فولادی و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، تأثیر قابل توجهی در بیشینه‌ی ظرفیت باربری نمونه نداشته است، با این حال بیشینه‌ی تغییر مکان



شکل ۲۱. اثر افزودن الیاف فولادی و درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در رفتار کششی (آزمایش برزیلی) بتن.

دارند. سنگ‌دانه‌های طبیعی به دلیل تهیه شدن از بستر رودخانه و یا شکستن سنگ طبیعی به کمک دستگاه در کارخانه، سطوح تیز گوشه‌ی کمتری دارند، که این موضوع در سنگ‌دانه‌های استفاده شده در بررسی حاضر کاملاً مشهود بود. در نتیجه اثر استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در نمونه‌ها در عرض ترک‌ها باید مد نظر قرار داده شود، که به این موضوع در آیین‌نامه‌ها توجه نشده است.

به منظور بررسی علت جامع‌تر اثرگذاری الیاف فولادی و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در رفتار تیرهای بتن مسلح، اثر افزودن الیاف فولادی و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در رفتار فشاری بتن بررسی شده است. نتایج بررسی انجام شده در شکل ۲۰، برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. افزودن الیاف فولادی باعث می‌شود تا ترک‌خوردگی فقط در پوسته‌ی بتن اتفاق افتد و نمونه فرو نیفتد، که این موضوع با افزودن ۲٪ الیاف فولادی محسوس‌تر شده است. همان‌طور که از تئوری سازه‌های بتنی مشخص است، خرابی نمونه‌ی استوانه‌ی تحت فشار به دلیل ضعف بتن در کشش و بروز ترک مورب اتفاق می‌افتد، که در وسط نمونه سبب بروز تغییر شکل رو به بیرون و نیز بروز کشش در وسط نمونه‌ی استوانه‌ی می‌شود. علت خرابی بتن، ضعف در کشش است و در نمونه‌های استوانه‌ی، بتن با تخریب هسته‌ی میانی نمونه، شکسته می‌شود. از این رو، با افزودن الیاف فولادی یک هسته‌ی مقاوم در نمونه‌ی بتنی ایجاد می‌شود، که مانع از فروپاشیدن آن می‌شود و فقط پوسته‌ی نمونه‌ی ترک‌می‌خورد و خراب می‌شود. از طرف دیگر، جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به دلیل بیشتر بودن

علاوه بر این، در حالتی که نمونه از جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی تهیه شده است، آیین‌نامه‌های ACI، NS، Eurocode 2 و CSA در حالتی که طول وصله کاهش یافته است، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند؛ در حالی که در نمونه با طول وصله‌ی میلگرد کامل، نتایج ارائه شده توسط آیین‌نامه‌های ACI و CEB – FIP منطقی‌تر بوده است.

۷. افزودن الیاف فولادی باعث می‌شود تا ترک خوردگی فقط در پوسته‌ی بتن نمونه‌ی استوانه‌یی تحت فشار اتفاق افتد و نمونه فرو نپاشد، که این موضوع با افزودن ۲٪ الیاف فولادی محسوس‌تر شده است.

۸. نمونه‌ی فاقد الیاف فولادی تحت کشش غیرمستقیم به دو قسمت تقسیم می‌شود. این در حالی است که افزودن الیاف فولادی مانع از شکست نمونه به دو قسمت می‌شود و نمونه با ایجاد لهیدگی تسلیم می‌شود. افزون بر این، استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی سبب ضعف کششی در نمونه می‌شود، که این ضعف با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌ها قابل جبران است.

نمونه به میزان قابل ملاحظه‌یی در مقایسه با زمانی که الیاف فولادی و فقط سنگ‌دانه‌ی بازیافتی استفاده می‌شوند، کاهش پیدا کرده است.

۵. با جایگزین کردن سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، ترک‌ها گسترش بیشتری پیدا کرده و عرض ترک‌ها کاهش یافته است. در نمونه‌های مذکور، 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 به دلیل 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 نمونه‌ی ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی طبیعی و فاقد الیاف فولادی، آیین‌نامه‌های ACI، NS، Eurocode 2 و CSA عرض ترک خمشی را برای هر سه طول وصله به صورت قابل قبول و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند.

## پانویس‌ها

1. Gergely & Lutz
2. Broms & Lutz

## منابع (References)

1. Esfahani, M.R. and Kianoush, M.R. "Development/splice length of reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **102**(1), (Jan. - Feb 2005).
2. ACI 544.1R-02. "State-of-the-art report on ber reinforced concrete", United States, **64**, (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*, **64**, pp. 84-92 (25 Feb 2015).
4. Ji, Y., Hu, Y., Zhang, L. and et al. "Laboratory studies on influence of transvers cracking on chloride-induced corrosion rate in concrete", *Cement & Concrete Composites*, **69** (Dec, 2015).
5. Lagier, F., Massicotte, B. and Charron, J.P. "Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC", *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 84-94 (Sep 2015).
6. Shah, P.S. "Do fibers increase the tensile strength of cement based material", *ACI Material Journal*, **88**(6), pp. 595-603 (Nov 1991).
7. Dai, L., Wang, L., Zhang, J. and et al. "A global model for corrosion-induced cracking in prestressed concrete

structures", *Engineering Failure Analysis*, **62**, pp. 263-275 (Apr 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**, pp. 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**, pp. 742-750 (2013).
10. Guo, Y., Zhang, J., Chen, G. and et al. "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**, pp. 193-203 (2014).
11. Carneiro, J.A., Lima, P.R.L., Leite, M.B. and et al. "Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, **46**, pp. 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**(8), pp. 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**, pp. 704-710 (2012).
14. Seara-Paz, S., González-Fontebpa, B., Martínez- Abella, F. and et al. "Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate", *Engineering Structures*, **156**, pp 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**, pp. 932-944 (2016).
16. Zaetanga, Y., Sata, V., Wongsu, A. and et al. "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, **111**, pp. 15-21 (15 May 2016).
17. Weiss, W.J. and 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 et al. "Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams", *Construction and Building Materials*, **186**, pp. 400-422 (2018).
19. Chaboki, H.R., Ghalehnovi, M., Karimipour, A. and et al. "Shear behaviour of concrete beams with recycled aggregate and steel fibres", *Construction and Building Materials*, **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**, pp. 126-136 (2018).
21. Tarek, T.M., Das, H.K., Mahmood, A.H. and et al. "Flexural performance of RC beams made with recycled brick aggregate", *Construction and Building Materials*, **134**, pp. 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*, **7**(2), pp. 98-121 (2018).
23. Goksu, C., Yilmaz, H., Chowdhury, S.R. and et al. "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*, **17**(5), pp. 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**, pp. 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**(4), pp. 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), pp. 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" ", CSA Group (June 2014).
30. CEB-FIP Model Code 2010. 2, "International federation for structural concrete (b)", United States, (2010).
31. Cohn, M.Z. and Bartlett, M. "Computer-simulated flexural test of partially pre-stressed concrete section", *ASCE Journal of Structural Division*, **108**(12), pp. 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).
33. Ji, H and Liu, C. "Ultimate shear resistance of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete beam" *Engineering Structures*, **203**, 109825, (15 January 2020).
34. Carmo, R.N.D., Valenca, J., Silva, D. and et al. "Assessing steel strains on reinforced concrete members from surface cracking pattern", *Construction and Building Materials*, pp. 265-275 (9 Aug 2015).
35. ACI 224R-01. "Control of cracking in concrete structure", United States, (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*, **62**(11), pp. 1395-1410 (Nov 1965).
38. Norwegian Council for Building Standardization, NS 3473E. "Concrete structures design rules. Norwegian council for building standardization", Norway (2003).
39. ACI 544.1R-02. "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete", United States (2002).
40. Zomorodian, M., Yang, G., Belarbi, A. and et al. "Cracking behavior and crack width prediction of FRP strengthened RC members under tension", *Engineering Structures*, pp. 313-324 (27 June, 2016).
41. Ji, X., Cheng, Y., Leong, T and et al. "Seismic behavior and strength capacity of steel coupling beam-to-SRC wall joints" *Engineering Structures*, **201**, 109820, 15 December (2019).
42. ASTM C136 / C136M-14. "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", ASTM International, West Conshohocken, PA (2014).
43. ASTM C29 / C29M-09. "Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate", ASTM International, West Conshohocken, PA (2009).
44. ASTM C127-12. "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate", ASTM International, West Conshohocken, PA (2012).
45. ASTM C128-15. "Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate", ASTM International West Conshohocken, PA (2015).

46. ASTM C33-03 “Standard specification for concrete aggregates”, ASTM International, West Conshohocken, PA (2003).
47. ASTM C293-08. “Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading)”, ASTM International (2008).
48. BS EN 12390 1. “Testing hardened concrete: shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds”, British Standards Institution (2000).
49. BS EN 12390-3. “Testing hardened concrete: compressive strength of test specimens 19”, British Standards Institution (2009).
50. BS EN 12390-2. “Testing hardened concrete: making and curing specimens for strength tests”, British Standards Institution (2000).