اثر استفاده از الیاف فولادی بازیافتی بر خواص بتن تازه و سخت‌شده

نعیم روشن[۱]، منصور قلعه‌نوی[۲]

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

ghalehnovi@um.ac.ir

خلاصه

به تازگی الیاف فولادی بازیافتی حاصل از ضایعات لاستیک به عنوان جایگزین کامل یا بخشی از الیاف فولادی صنعتی در بتن مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این نوع الیاف به سبب بهره‌گیری از مواد بازیافتی در بتن با دیدگاه توسعه‌ی پایدار نیز همسو است. در این مقاله مروری، اثر الیاف فولادی بازیافتی بر بتن مورد بررسی قرار گرفته است. در صورت افزودن درصد بهینه‌ی الیاف فولادی بازیافتی، می‌توان خصوصیات مکانیکی قابل‌توجهی را در مقایسه با الیاف فولادی صنعتی فراهم کرد. در صورت استفاده از این نوع الیاف به دلیل نسبت ابعادی کوچک‌تر، تمایل به درهم آمیختن الیاف کاهش می‌یابد و در نتیجه کارایی بتن کمتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین افزایش تخلخل در صورت استفاده از الیاف فولادی بازیافتی مشاهده شد. حضور الیاف فولادی بازیافتی می‌تواند برای مقاومت فشاری بتن تا اندازه‌ای مفید باشد، اما اگر حجم زیادی از الیاف در طرح اختلاط بتن به کار گرفته شود، افزودن آب اضافی که به منظور غلبه بر مشکلات مربوط به کارایی بتن بکار می‌رود، می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری بتن به دلیل افزایش تخلخل شود.

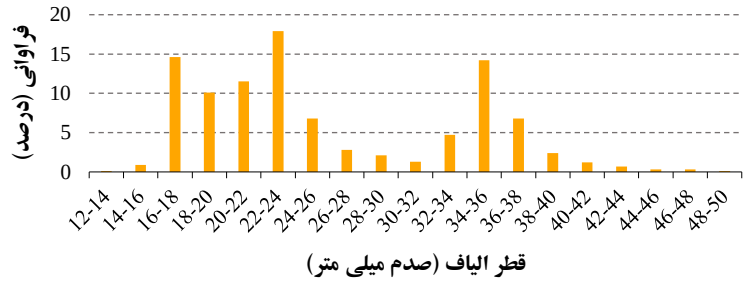
کلمات کلیدی: الیاف فولادی بازیافتی، خواص بتن تازه، خواص بتن سخت‌شده، تخلخل، مقاومت فشاری

۱. مقدمه

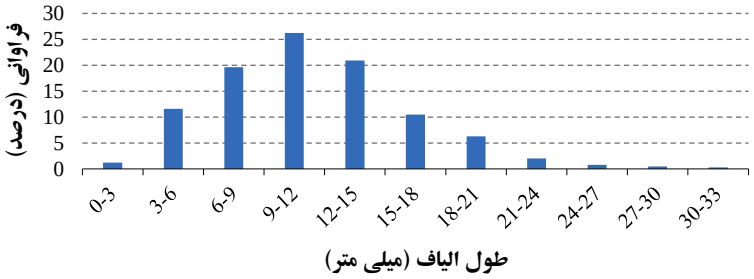
امروزه بازیافت لاستیک وسایل نقلیه به دلیل تهدیدی که برای محیط‌زیست محسوب می‌شوند به یک ضرورت تبدیل شده است. در کشورهای پیشرفته سالانه و به ازای هر نفر تقریباً یک تایر فرسوده تولید می‌شود. لاستیک‌های استفاده‌شده منبعی از انرژی و محصولات شیمیایی باارزش هستند. با تجزیه این لاستیک‌ها، می‌توان ترکیبات مفید آن‌ها را بازیابی کرد [۱, ۲]. الیاف فولادی حاصل از بازیافت لاستیک وسایل نقلیه می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی یا کامل الیاف فولادی صنعتی در بتن الیافی مورد استفاده قرار گیرد. هرچند سابقه این جایگزینی بسیار طولانی نمی‌باشد، ضروری است تا با مطالعه کارهای پیشینیان به تازه‌ترین دستاوردها در این زمینه دست یافت. در مقاله حاضر، به بررسی حضور الیاف فولادی بازیافتی بر خواص تازه و سخت‌شده بتن خواهیم پرداخت. بدین منظور، آزمایش‌های مربوط به کارایی بتن تازه و همچنین آزمایش‌های مربوط به مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده از الیاف مذکور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. مشخصات الیاف فولادی بازیافتی

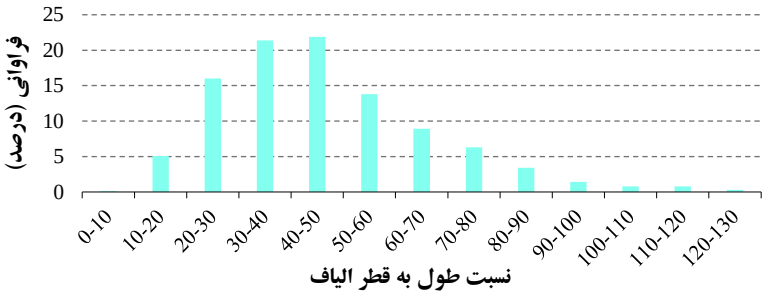
مشخصات الیاف فولادی حاصل از بازیافت وسایل نقلیه تابعی از روش و نوع بازیافت لاستیک است [۳, ۴]. یکی از متداول‌ترین فرآیندهای بازیافت لاستیک استفاده از دستگاه‌های خردکننده است که در چند مرحله ابتدا لاستیک را به قطعات کوچک‌تر تقسیم نموده و سپس با استفاده از دستگاه shredder اقدام به جداسازی الیاف از قطعات لاستیک می‌کند، در ادامه این الیاف فولادی با استفاده از آهنربا به طور کامل از لاستیک جدا می‌شود [۵]. الیاف حاصل از چنین فرآیندی دارای مشخصات طول و قطر متفاوت بوده و همچنین نسبت طول به قطر (نسبت ابعادی) آن نیز در بازه بین ۱۰ تا ۱۰۰ قرار می‌گیرد. سطح الیاف فولادی بازیافتی نیز شامل خرده لاستیک چسبنده به سطح الیاف است. این مشخصات توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در هر مطالعه، مشخصات تعدادی (معمولا بالای ۱۰۰۰ رشته) از الیاف فولادی بازیافتی اندازه‌گیری شده است. به طور مثال، در مطالعه‌ای که توسط مارتینلی و همکاران [۶] صورت گرفت، حدود ۲۰۰۰ رشته از این نوع الیاف مورد بررسی قرار گرفت و قطر، طول، نسبت ابعادی و همچنین تصویر میکروسکوپی سطح الیاف مورد بررسی قرار گرفت. در شکل‌های ۱، ۲، ۳، و ۴ به ترتیب این اطلاعات قابل مشاهده است.



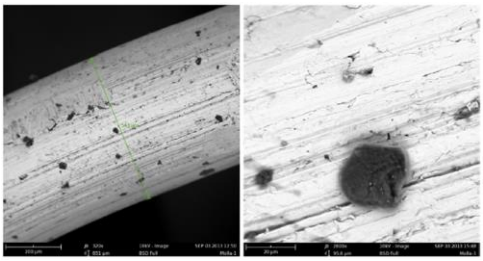
شکل ۱- فراوانی قطر الیاف فولادی بازیافتی در پژوهش مارتینلی و همکاران [٦]



شکل ۲- فراوانی طول الیاف فولادی بازیافتی در پژوهش مارتینلی و همکاران [٦]



شکل ۳- نسبت ابعادی (طول به قطر) الیاف فولادی بازیافتی در پژوهش مارتینلی و همکاران [٦]



شکل ٤- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح الیاف فولادی بازیافتی [٦]

۳. کارایی بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی

در بتن تقویت‌شده با الیاف، کارایی یکی از عمده‌ترین محدودیت‌ها برای عملکرد بهتر بتن در حالت سخت‌شده است. در راستای ساخت مناسب‌ترین طرح اختلاط بتن، کارایی بتن پارامتر اصلی است و به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع و محتوای الیاف فولاد بازیافتی قرار می‌گیرد [۷]. اگر چه آزمون اسلامپ، به عنوان یک بررسی استاندارد برای تعیین کارایی یک طرح اختلاط بتن شناخته شده است، اما به گفته بسیاری از محققان، این آزمایش اطلاعات کافی در مورد تجزیه و تحلیل کمی کارایی بتن حاوی الیاف را ارائه نمی‌دهد، اما می‌تواند به عنوان یک روش کنترل کیفیت پذیرفته شود [۸]. بنساسی و همکاران

[۹] طرح اختلاط بتن خودتراکم حاوی ضایعات لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی علاوه بر آزمایش اسلامپ، آزمایش جعبه L و زمان قیف v-شکل و زمان T500 نیز اندازه‌گیری شد. طرح بتن خودتراکم با استفاده از حداکثر ۱ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی مطابق با استاندارد EFNARC خصوصیات قابل قبولی را از خود نشان داد، اما در طرح حاوی ۱/۵ درصد حجمی الیاف خصوصیات بدست آمده برای بتن تازه قابل قبول نبودند. تمایل به درهم آمیختن الیاف فولادی هنگام اختلاط به عنوان یکی دیگر از مشکلات بالقوه‌ی موثر بر کاهش کارایی بتن حاوی این نوع الیاف شناخته می‌شود و در کارهای پیشینیان به عنوان اثر "توده‌ای شدن" (balling) شناخته می‌شود. تنوع در اندازه و شکل الیاف فولادی بازیافتی به عنوان یکی از مهمترین دلایل اثر توده‌ای شدن در بتن تازه شناخته شده است [۱۰]. افزایش مقدار فوق‌روان‌کننده، تغییر در روش اختلاط، کاهش نسبت طول به قطر مورد استفاده و همچنین کاهش درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی می‌تواند مشکلات مربوط به کارایی و اثر توده‌ای شدن الیاف در بتن را برطرف کند. برای جلوگیری از اثر توده‌ای شدن، برخی از توصیه‌ها در ادامه ارائه شده است: ۱) افزودن تدریجی الیاف فولادی بازیافتی در هنگام اختلاط بتن [۷]، ۲) نسبت طول به قطر الیاف فولادی بازیافتی باید به ۲۰۰، درصد حجمی به ۰/۵ ٪ و مقدار آن به ۳۰ کیلوگرم در متر مکعب بتن محدود شود [۱۱]، ۳) افزودن فوق‌روان‌کننده به طور موثری کارایی بتن وهمچنین پراکندگی الیاف فولادی بازیافتی را در بتن تازه افزایش می‌دهد [۱۱].

۴. تخلخل بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی

در بتن تقویت‌شده با الیاف، با استفاده از آب اضافی می‌توان به کارایی قابل‌قبول دست یافت، اما این کار می‌تواند منجر به ایجاد منفذهای بیشتر در ماتریس بتن شود. همچنین، هر ماده‌ی اضافی، یعنی لاستیکِ متصل به سطح الیاف فولادی بازیافتی (همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است) می‌تواند باعث عدم پیوستگی مناسب با ماتریس سیمانی اطراف خود شود، که در نتیجه باعث افزایش تخلخل می‌شود و از این رو عملکرد مکانیکی بتن الیافی را کاهش می‌دهد. آزمایش سرعت پالس التراسونیک (UPV) می‌تواند درکی از تخلخل و نحوه‌ی توزیع الیاف فولادی بازیافتی در بتن را فراهم کند. الیاف فولادی باعث کاهش کارایی می‌شوند که منجر به تراکم نامناسب بتن در حالت تازه می‌شود. بنابراین تخلخل بتن افزایش می‌یابد که این می‌تواند با کاهش UPV خود را نشان دهد [۸]. افزایش تخلخل در بتن مسلح با الیاف فولادی بازیافتی مشاهده شد و نتایج UPV نشان داد که با افزودن ۲ درصد حجمی از الیاف فولادی بازیافتی، سرعت پالس التراسونیک ۳ تا ۷ درصد کاهش می‌یابد [۱۲]. در ادامه، مشخص شد که افزودن پودر نانوسیلیکا در کاهش تخلخل بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی موثر است و نتیجه‌گیری شد که به دلیل اندازه‌ی کوچک، نانوسیلیس به عنوان پرکننده عمل می‌کند و منجر به کاهش قابل‌توجه تخلخل می‌شود [۱۳]. یک مطالعه اخیر نشان داد که سرعت پالس التراسونیک بتن تقویت شده با الیاف بازیافتی حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد در حالی که در صورت استفاده از ترکیب الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی حدود ۱۵ درصد کاهش مشاهده شد. این امر به دلیل دشواری در تراکم بتن هنگام استفاده ترکیبی از الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی بوجود می‌آید [۱۴].

۵. مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی

هنگام بررسی مقاومت فشاری بتن، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی بازیافتی با نمونه‌های حاوی الیاف فولادی صنعتی قابل مقایسه هستند. هرچند افزایش کمتر مقاومت فشاری در صورت استفاده از الیاف فولادی بازیافتی به جای الیاف فولادی صنعتی مشاهده می‌شود، اما حضور الیاف فولادی بازیافتی می‌تواند برای مقاومت فشاری بتن تا اندازه‌ای مفید باشد. در شکل ۵، مود شکست فشاری در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی بازیافتی و صنعتی قابل مشاهده است. چنانچه حجم زیادی از الیاف در طرح اختلاط بتن به کار گرفته شود، افزودن آب اضافی که به منظور غلبه بر مشکلات مربوط به کارایی بتن بکار می‌رود، می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری بتن به دلیل افزایش تخلخل شود [۱۵]. در مطالعه‌ای که توسط ستوده و جلال صورت گرفت، با افزودن پودر نانوسیلیکا به بتن حاوی ۵ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی، مقاومت فشاری نسبت به نمونه بتن ساده تا ۸۰ درصد افزایش داشت [۱۳]. در ادامه، یک اثر هم‌افزایی مثبت با ترکیب الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی مشاهده شد. بدین ترتیب با استفاده از ۱ و ۰/۵ درصد الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی در بتن، کنترل بهتر ترک‌ها و ایجاد مهار مکانیکی در ماتریس بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری تا ۵۰ ٪ می‌شود [۱۶].

ب الف

شکل ۵- مود شکست فشاری در (الف) بتن حاوی الیاف فولادی صنعتی و (ب) بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی [۱۷]

درصد حجمی الیاف به گونه‌ی قابل‌توجهی بر رفتار بتن تأثیر می‌گذارد. با این وجود، هیچ پیشرفت قابل‌توجهی در مقاومت فشاری بتن در درصدهای کم الیاف مشاهده نشده است [۱۸]. نشان داده شد که با افزودن ترکیبی از الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی تا حداکثر ۰/۵ ٪ حجمی، هیچ بهبود قابل‌توجهی صورت نگرفت و مقاومت فشاری بتن تنها از ۳۶/۷ مگاپاسکال به ۳۷/۴ مگاپاسکال افزایش یافت . می‌توان این گونه استنباط کرد که در درصدهای حجمی کم الیاف فولادی بازیافتی مقاومت فشاری بتن عمدتا به ساختار داخلی بتن بستگی دارد تا اثر مثبت الیاف فولادی [۱۹]. در ادامه، پژوهشگران دریافتند که افزودن میکروسیلیس به بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی نه تنها ماتریس بتن متراکم‌تری را ایجاد می‌کند (به علت ریزدانه بودن میکروسیلیس) بلکه اصطکاک بین سطح الیاف و ماتریس اطراف آن را نیز افزایش می‌دهد که در نهایت راهی کارآمد برای افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی فراهم می‌کند [۲۰, ۲۱].

از سوی دیگر، بکارگیری درصدهای حجمی بیشتر الیاف بر ساختار ماتریس بتن تأثیر منفی می‌گذارد که در نهایت منجر به افت مقاومت فشاری بتن می‌شود. در پژوهشی با استفاده از الیاف بازیافتی تا حداکثر ۰/۷۵ درصد حجمی، نتایج نشان داد در درصد حجمی الیاف به میزان ۰/۵ ٪، حدودا ۵ درصد بهبود در مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. در مقابل، اثر معکوس در هنگام اضافه شدن درصد حجمی الیاف بازیافتی فولادی در ۰/۷۵ ٪ حجمی مشاهده می‌شود که منجر به پراکندگی ضعیف الیاف و ایجاد ماتریس ناهمگن بتن می‌شود. این ناپیوستگی در ساختار ماتریس در نهایت منجر به ۸ درصد مقاومت فشاری کمتر می‌شود [۲۲]. در مطالعه‌ی دیگری، درصد حجمی بهینه برای استفاده‌ی ترکیبی الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی پیشنهاد شد. مشخص شد که با استفاده‌ی همزمان از ۳۰ ٪ الیاف فولادی صنعتی و ۷۰ ٪ الیاف بازیافتی تا ۱ ٪ حجمی کل الیاف، مقاومت فشاری ۵ تا ۱۰ درصد افزایش یافته است اما وقتی درصد حجمی الیاف به بیشتر از ۱/۲۵ ٪ می‌رسد، این حجم بالای الیاف منجر به از دست دادن مقاومت فشاری در حدود ۵ ٪ می‌شود [۲۳]. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج بررسی مختلف در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خلاصه ای از نتایج پژوهش ها بر روی مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی

منبع	طول الیاف (میلی متر)	قطر الیاف (میلی متر)	مقدار الیاف (درصد یا محتوا)	درصد تغییرات در مقاومت فشاری
[۱۷]	۳۱/٤	۰/۲٤	٪ ۰/٤٦	۲۵
[۲٤]	۵۰	۰/٦	٤۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۹
[۱۵]	۲٦	۰/۲٦	٪ ۰/۲۳	۲۰
[۲۲]	۵۰	۱/۲	٪ ۰/۷۵	-۸
[۷]	٤۰	۰/۱۵	٪ ۰/۷۵	۱۸
[۲۵]	۲۵/٤	۰/۲۵	٪ ۱	۱۲/۵
[۲٦]	۲۳	۰/۲۲	۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۱۰
[۲۷]	۱۳/۹٤	۰/۲۵	٪ ۰/٤٦	-۳
[۱٤]	۵۰	۰/۱۵	٪ ۱/۵	٤۰
[۲۸]	۲۹/۱۷	۰/۲۵	۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۲۲/۲
[۹]	۵۵	۰/۱۲	٪ ۱/۵	-۹

۶. مقاومت کششی بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی

در چند سال اخیر، پژوهش‌هایی برای بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی انجام شده است. این مطالعه‌ها نشان داد که افزودن ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی و الیاف فولاد صنعتی به بتن، می‌تواند مقاومت کششی را به ترتیب ۲۸و ۳۳ درصد در مقایسه با بتن ساده (بدون

الیاف) افزایش دهد. با مشارکت الیاف، مود شکست تردِ بتن ساده به همراه تعداد کمتر ترک‌ها در طول نمونه بتنی به رفتاری شکل‌پذیر همراه با تعداد ترک‌های بیشتر در هنگام شکست تبدیل شد [۲۲]. بیشتر، فرهان و همکاران به منظور تقویت رفتار پیش و پس از ترک‌خوردگی روسازی‌های بتنی از الیاف فولادی بازیافتی استفاده کردند. آنها در این مطالعه از ۰/۲۵، ۰/۵، و ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی بهره بردند. در شکل ۶، اثر الیاف بر رفتار نمونه‌ی تحت کشش غیرمستقیم نشان داده شده است. به نظر می‌رسد طول و قطر متغیر الیاف یک مکانیزم اضافی بهم‌پیوستگی را فراهم می‌کند که با ۵۰ درصد افزایش مقاومت کششی در صورت افزودن ۰/۷۵ درصد حجمی از الیاف فولادی بازیافتی به مخلوط روسازی مشاهده می‌شود [۲۹].

٪ ۰/۲۵ ٪ ۰/۵ ٪ ۰/۷۵

شکل ٦- مود شکست کششی بتن روسازی حاوی (الف) ۰/۲۵ ٪، (ب)۰/۵ ٪، و (ج)۰/۷۵ ٪ الیاف فولادی بازیافتی [۲۹]

در سال ۲۰۱۸، سعی شد با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن، فولادی بازیافتی و صنعتی و همچنین ترکیبی از آنها تا ۱/۵ درصد حجمی، خواص مکانیکی بتن خودتراکم بهینه شود. الیاف فولادی بازیافتی نسبت به بتن ساده مقاومت کششی را تا ۲۵ ٪ افزایش می‌دهد. در حالی که حداکثر افزایش مقاومت کششی برای نمونه حاوی الیاف ترکیبی با ۱ ٪ الیاف فولادی صنعتی و ۰/۵ ٪ الیاف فولادی بازیافتی مشاهده شد [۱۶]. این‌گونه می‌توان استدلال کرد که مهار مکانیکی و پتانسیل برتر الیاف فولادی در پل‌زدن، اثر تقویت‌کنندگی این نوع الیاف را افزایش می‌دهد [۲۶]. نتایج نشان داد که برای بتن حاوی یک نوع از الیاف، ۱/۵ ٪ حجمی الیاف بازیافتی بهینه به نظر می‌رسد در حالی که در صورت استفاده‌ی ترکیبی، ۱ ٪ الیاف فولادی صنعتی و ۰/۵ ٪ الیاف فولادی بازیافتی می‌تواند بهترین خصوصیات مکانیکی را فراهم کند [۱۶].

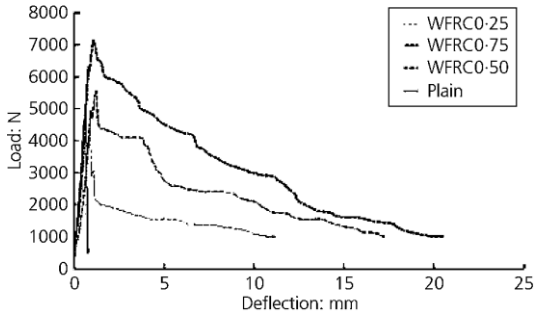
جدول ۲- خلاصه ای از تاثیر الیاف فولادی بازیافتی بر مقاومت کششی بتن

منبع	طول الیاف (میلی‌متر)	قطر الیاف (میلی‌متر)	مقدار الیاف (درصد حجمی یا محتوا)	درصد تغییرات در مقاومت کششی
[۲٤]	٥٠	٪ ۰/٦	٤٠ کیلوگرم بر متر مکعب	۳۲
[۲۲]	٥٠	٪ ۱/۲	٪ ۰/۷٥	۲۸
[۷]	٤٠	٪ ۰/۱٥	٪ ۰/۷٥	۳۰
[۳۰]	۲۰	٪ ۰/۱۸	٪ ۰/٦	۱٤
[۲٥]	۲٥/٤	٪ ۰/۲٥	٪ ۱	۲۳
[۳۱]	٦۰	٪ ۰/۲۷	٪ ٤	۷۸
[۲۸]	۲٦/۲	٪ ۰/۲٥	٥۰ کیلوگرم بر مترمکعب	٤۳

در یک مطالعه‌ی دیگر، محققان دریافتند که افزودن الیاف فولادی (چه صنعتی و چه بازیافتی) بدون توجه به نسبت هر کدام، مقاومت کششی بتن خودتراکم بین ۲۲ تا ۳۰ درصد رشد خواهد داشت. مکانیزم شکست در آزمون کشش غیرمستقیم برای بتن حاوی الیاف فولادی با الگوهای ترک پیوسته همراه است [۳۲]. همچنین، تصویربرداری دیجیتال نشان داد که در ابتدا یک ترک مرکزی منحصر به فرد در بتن حاوی الیاف فولادی تشکیل می‌شود و ترک‌های ثانویه در لبه‌های نمونه ایجاد می‌شوند. تعداد و الگوی این ترک‌های ثانویه به نحوه‌ی بازتوزیع تنش‌ها بستگی دارد، که خود تحت تأثیر ویژگی‌های الیاف فولادی است [۸۵]. جایگزینی ۱/۵ ٪ از الیاف فولاد صنعتی با الیاف فولاد بازیافتی، تأثیر قابل توجهی در بازتوزیع تنش‌ها نداشت. این مطلب توسط پژوهشگران دیگر نیز تایید شد که الیاف فولادی صنعتی را می‌توان با مقدار مساوی الیاف بازیافتی جایگزین کرد بدون اینکه مقاومت کششی نمونه‌ها تغییر چندانی داشته باشد [۲۲]. در جدول ۲ خلاصه‌ای پژوهش‌های اخیر درباره اثر الیاف فولادی بازیافتی بر مقاومت کششی بتن مورد توجه قرار می‌گیرد.

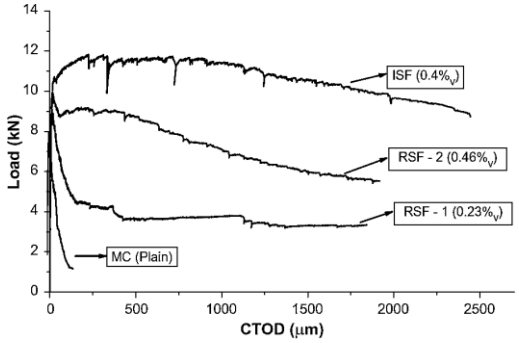
۷. مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی

مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی نسبت به بتن بدون الیاف بهبود یافته است. این رفتار نه تنها به نوع و کیفیت الیاف بلکه به تعداد الیاف موجود در مخلوط نیز بستگی دارد. با توجه به شکل ۷، آقایی و همکاران با استفاده از ۰/۲۵ ٪، ۰/۵ ٪، و ۰/۷۵ ٪ حجمی الیاف فولادی بازیافتی، افزایش تدریجی ظرفیت خمشی و رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ی بتنی حاوی این نوع الیاف را مشاهده نمودند. بیشینه مقاومت خمشی و جذب انرژی در نمونه‌ی حاوی ۰/۷۵ ٪ حجمی الیاف فولادی بازیافتی (WFRC0.75) مشاهده می‌شود. مقدار جذب انرژی این طرح برابر با ۲۸ برابر جذب انرژی طرح بدون الیاف ثبت شد [۲۲]. الیاف فولادی بازیافتی با قابلیت پل زدن و کنترل ترک‌ها، بهبود رفتار پس از ترک‌خوردگی بتن را فراهم می‌کند [۲۷].



شکل ۷- رفتار بار-تغییرمکان نمونه حاوی الیاف فولادی بازیافتی در مقایسه با نمونه بدون الیاف[۲۲]

الیاف فولادی بازیافتی می‌تواند از نظر ظرفیت جذب انرژی و مقاومت پسماند پس از شروع ترک بر اثر بارگذاری خمشی، نتایج قابل مقایسه‌ای با الیاف فولادی صنعتی ارائه کند. شکل ۸ نشان می‌دهد که بتن ساده و بدون هیچ نوع الیاف، هیچ مقاومتی در برابر انتشار ترک و جذب انرژی پس از حداکثر بار ایجاد نمی‌کند و به دلیل بارگذاری خمشی با افت ناگهانی پس از رسیدن به اوج ظرفیت خمشی روبه‌رو است. در حالی که بتن حاوی الیاف فولادی پس از ترک‌خوردگی اولیه با افت تدریجی سطح بارگذاری اقدام به جذب انرژی از طریق انتقال تنش توسط الیاف می‌کند. بتن حاوی ۰/۲۳ ٪ حجمی الیاف فولادی بازیافتی نسبت به نمونه بتن بدون الیاف رفتار شکل‌پذیری از خود نشان می‌دهد و پس از اوج ظرفیت دچار افت ناگهانی نمی‌شود. همچنین، بتن حاوی ۰/۴ ٪ از الیاف فولادی صنعتی (ISF) و بتن حاوی ۰/۴۶ ٪ حجمی الیاف فولادی بازیافتی با ایجاد مقاومت در برابر انتشار ترک، رفتار شکل‌پذیر پس از ترک‌خوردگی را نشان می‌دهند [۱۵].



شکل ۸- رفتار بار در برابر بازشدگی دهانه ترک در بتن بدون الیاف، بتن حاوی الیاف فولادی صنعتی و بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی [۱۵]

جدول ۳- اثر الیاف فولادی بازیافتی بر مقاومت خمشی بتن

منبع	میانگین طول الیاف (میلی‌متر)	میانگین قطر الیاف (میلی‌متر)	مقدار الیاف (درصد حجمی یا محتوا)	درصد تغییرات در مقاومت خمشی
[۱۷]	۰/۲٤	۳۱/٤	٪ ۰/٤٦	-۱۵
[۲٤]	۰/٦	۵۰	٤۰ کیلوگرم بر مترمکعب	٦۸
[۱۵]	۰/۲٦	۲٦	٪ ۰/۲۳	۱٦
[۷]	۰/۱۵	٤۰	٪ ۰/۷۵	۲۵
[۲۵]	۰/۲۵	۲۵	٪ ۱	۳۱
[۱٤]	۰/۱۵	۵۰	٪ ۱/۵	۲۵

[۲۸]	۰/۲۵	۲۶	۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۳۰
[۹]	۰/۱۲	۵۵	٪ ۱/۵	۴۰

در مطالعه‌ی بتن حاوی الیاف فولادی، نسبت ابعادی الیاف از اهمیت بالایی برخوردار است. نسبت ابعادی (طول به قطر الیاف) بیشتر الیاف فولادی، بهبود قابل‌توجهی در شکل‌پذیری و پاسخ خمشی را فراهم می‌کند. در مطالعه‌ای که توسط یو وهمکاران صورت گرفت، سه نسبت ابعادی ۶۵ (کوچک)، ۹۷ (متوسط) و ۱۰۰ (بزرگ) برای الیاف فولادی (صاف) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، مقاومت خمشی نمونه حاوی الیاف با نسبت ابعادی متوسط و بزرگ در مقایسه با نمونه حاوی الیاف با نسبت ابعادی کوچک افزایش را نشان می‌دهد. در واقع، برای الیاف بلندتر به دلیل ایجاد مهار مکانیکی و طول پیوستگی بیشتر در ماتریس بتن، مقاومت خمشی در هنگام ترک‌خوردگی نمونه دچار افت کمتری می‌شود [۳۳]. در ادامه جدولی (جدول ۳) از نتایج پژوهش‌های اخیر درباره اثر الیاف فولادی بازیافتی بر مقاومت خمشی بتن آمده است.

۸. نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های اخیر، به نظر می‌رسد الیاف فولادی بازیافتی توانایی جایگزینی بخشی از الیاف فولادی صنعتی را در بتن الیافی دارند. بتن تازه حاوی کمتر از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی از کارایی قابل قبولی برخوردار است و بدون افزودن آب اضافی قابل استفاده خواهد بود. همچنین در صورت استفاده از این الیاف، نیاز به استفاده از مواد افزودنی پودری در بتن به منظور کسب تراکم کافی و پرهیزی از تخلخل زیاد احساس می‌شود. برخلاف نتایج با پراکندگی زیاد در مورد مقاومت فشاری، اثر این نوع الیاف بر مقاومت کششی و خمشی بتن مثبت ارزیابی می‌شود و در صورت استفاده از درصد بهینه می‌توان به اثر تقریبا مشابه الیاف فولادی صنعتی در بتن دست یافت. از طرفی، باید در نظر داشت که مشخصات مکانیکی متفاوت الیاف فولادی بازیافتی نسبت به همتای صنعتی‌شان سبب نیاز به انجام پژوهش‌های بیشتر به منظور درک رفتار بتن حاوی الیاف فولادی بازیافتی می‌گردد.

۹. منبع‌ها

[۱] M. Meghdadaian and M. Ghalehnovi, "Improving seismic performance of composite steel plate shear walls containing openings," *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 336-342, 2019.

[۲] A. Arabshahi, S. R. Aghouy, M. Meghdadian, and N. Gharaei-Moghaddam, "Evaluation of the Bond Strength Models between Fiber Reinforced Polymers and Concrete".

[۳] M. Meghdadian, N. Gharaei-Moghaddam, A. Arabshahi, N. Mahdavi, and M. Ghalehnovi, "Proposition of an equivalent reduced thickness for composite steel plate shear walls containing an opening," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 168, p. 105985, 2020.

[٤] A. Arabshahi, N. Gharaei Moghaddam, and M. Tavakkolizadeh, "A New Strength Model for FRP Confined Circular Concrete Columns," in *Third Confrance on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, 2015.

[٥] J. Sabzi, E. Asadi Shamsabadi, M. Ghalehnovi, S. A. Hadigheh, A. Khodabakhshian, and J. d. Brito, "Mechanical and Durability Properties of Mortars Incorporating Red Mud, Ground Granulated Blast Furnace Slag, and Electric Arc Furnace Dust," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 4110, 2021.

[٦] E. Martinelli, A. Caggiano, and H. Xargay, "An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 290-298, 2015.

[٧] M. Mastali and A. Dalvand, "Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC)," *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. ۲۰۹-۱۹٦, ۲۰۱٦.

[٨] K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, and C. H. Bu, "Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 50, pp. 499-507, 2014.

[٩] H. Bensaci, B. Menadi, and S .Kenai, "Comparison of Some Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete Composites Containing Rubber and Steel Fibers Recovered from Waste Tires," in *Nano Hybrids and Composites*, 2019, vol. 24, pp. 8-13: Trans Tech Publ.

[۱۰] A. A. A. A .A. Awal, L. L. Yee, and M. Z. Hossain, "Fresh And Hardened Properties Of Concrete Containing Steel Fibre From Recycled Tire," *Malaysian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 1, 2013.

[۱۱] K. Liew and A. Akbar, "The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 232, p. 117232, 2020.

[۱۲] A. A. Awal, M. A. Ab Kadir, L. L. Yee, and N. Memon, "Strength and Deformation Behaviour of Concrete Incorporating Steel Fibre from Recycled Tyre," in *InCIEC 2* :۰۱٤Springer, 2015, pp. 109-117.

[۱۳] M. H. Sotoudeh and M. Jalal, "Effects of waste steel fibers on strength and stress-strain behavior of concrete incorporating silica nanopowder," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 5411-7, 2.۰۱۳

[۱٤] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifard, and M. Illikainen, "Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 166, pp.۲۰۱۸ ,۲۲٦-۲۱٤ .

[۱٥] M. A. Aiello, F. Leuzzi, G. Centonze, and A. Maffezzoli, "Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength," *Waste management*, vol. 29, no. 6, pp. 1960.۲۰۰۹ ,۱۹۷۰-

[۱٦] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifard, Z. Abdollahnejad, and M. Illikainen, "Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers," *Composites Part B: Engineering*, vol. 151, pp. 186-200, 2018.

[۱۷] G. Centonze, M. Leone, and M. Aiello, "Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp.۲۰۱۲ ,٥۷-٤٦ .

[۱۸] J. Krolo, D. Damjanović, I. Duvnjak, D. Bjegović, S. Lakušić, and A. Baričević, "Innovative low cost fibre-reinforced concrete. Part II: Fracture toughness and impact strength," in *Proc. of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, 2012, pp. 204-209.

[۱۹] M. A. Köroğlu, "Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires," *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, vol. 17, no. 3, pp. 4.۲۰۱۸ ,٤۹۸-۸٤

[۲۰] M. Mastali *et al.*, "A comparison of the effects of pozzolanic binders on the hardened-state properties of high-strength cementitious composites reinforced with waste tire fibers," *Composites Part B: Engineering*, vol. 162, pp. 134-153, 2.۰۱۹

[۲۱] M. Ghalehnovi, N. Roshan, E. Hakak, E. A. Shamsabadi, and J. de Brito, "Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers," *Journal of Cleaner Production*, vol. 2 ,٤۰p. 118213, 2019.

[۲۲] K. Aghaee, M. A. Yazdi, and K. D. Tsavdaridis, "Investigation into the mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires," *Magazine of Concrete research*, vol. 67, no. 4, pp. 197-205, 2015.

[۲۳] A. Caggiano, P. Folino, C. Lima, E. Martinelli, and M. Pepe, "On the mechanical response of hybrid fiber reinforced concrete with recycled and industrial steel fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 286-295, 2017.

[۲٤] O. Sengul" ,Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires," *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 649-658, 2016.

[۲٥] F. A. I. Fauzan, R. Sandi, N. Syah, and A. P. Melinda, "The effects of steel fibers extracted from waste tyre on concrete containing palm oil fuel ash," *International Journal*, vol. 14, no. 44, pp. 142-148, 2018.

[۲٦] H. Hu, P. Papastergiou, H. Angelakopoulos, M. Guadagnini, and K. Pilakoutas, "Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 376-389, 2018.

[۲۷] M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli, and M. Aiello, "Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour," *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 141-155, 2018.

[۲۸] Ł. Skarżyński and J. Suchorzewski, "Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography," *Construction and Building Materials*, vol. 183, pp. 283-299, 2018.

[۲۹] A. H. Farhan, A. R. Dawson, and N. H. Thom, "Recycled hybrid fiber-reinforced & cement-stabilized pavement mixtures: tensile properties and cracking characterization," *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 488-499, 2018.

[۳۰] C. G. Papakonstantinou and M. J. Tobolski, "Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete," *Cement and concrete research*, vol. 36, no. 9, pp. 1686-169.۲۰۰٦ ,۱

[۳۱] M. A. Köroglu and A. Ashour, "Mechanical properties of self-compacting concrete with recycled bead wires," *Revista de la construcción,* vol. 18, no. 3, pp. 501-512, 2019.

[۳۲] C. Achilleos, D. Hadjimitsis, K. Neocleous, K. Pilakoutas, P. O. Neophytou, and S. Kallis, "Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost," *Sustainability,* vol. 3, no. 7, pp. 965-983, 2011.

[۳۳] D.-Y. Yoo, S. Kim, G.-J. Park, J.-J. Park, and S-.W. Kim, "Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites," *Composite Structures,* vol. 174, pp. 375-388, 2017.