

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بتن الیافی و ارزیابی آن

ذبیح اله بیگی^۱، محمدعلی دشتی رحمت‌آبادی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران مدیریت ساخت، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

Z_beigi1995@yahoo.com

چکیده

استفاده از الیاف در بعضی از کشورها به چند هزار سال پیش بر می‌گردد. امروزه اصلاح و بهبود رفتار بتن با استفاده از الیاف یکی از روش‌های متداول در تکنولوژی بتن محسوب می‌شود. افزودن الیاف به بتن باعث رشد مقاومتی، بهبود رفتار تنش-کرنش و افزایش شکل‌پذیری خواهد شد. با توجه به خواص بتن الیافی، تولید و کاربرد الیاف در کشورهای صنعتی جهان از طیف وسیعی برخوردار شده و در حال حاضر انواع الیاف با مشخصات فنی و موارد کاربرد گوناگون بصورت صنعتی تولید انبوه می‌گردد. با توجه به لزوم توجه بیشتر به ضرورت توسعه تولید و استفاده از تکنولوژی بتن الیافی، تحقیق حاضر تلاش دارد با توجه به تنوع الیاف از لحاظ جنس، شکل، اندازه و... به بررسی و شناخت دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن که از کاربردی‌ترین و پرمصرف‌ترین الیاف‌های مورد استفاده در بازار روز جهانی هستند، بپردازد تا زمینه توسعه هرچه بیشتر این تکنولوژی که سال‌ها در کشورهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، در ایران نیز فراهم آید. در این پژوهش دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با درصدهای مختلف هم بصورت مجزا و هم بصورت ترکیبی با بتن ساخته شده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بیانگر آن بوده است که پس از گذشت ۲۸ روز از ساخت نمونه‌ها، نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی دارای بیشترین افزایش مقاومت و نمونه‌هایی که هم‌زمان حاوی ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۷۵٪ الیاف فولادی بودند، در جایگاه بعدی قرار دارند.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن.

۱- مقدمه

با گذشت زمان و افزایش جمعیت دنیا نیاز به پیشرفت در زمینه ساخت‌وساز، نگهداری و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و استفاده از تکنولوژی‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. علاوه بر این لزوم ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به دلیل افزایش لرزه‌خیزی کشورهای دنیا بیشتر احساس می‌شود. از جمله تکنولوژی‌های نوین که جایگاه ویژه‌ای در ساخت‌وساز به خود اختصاص داده، افزودنی‌های بتن و الیاف تقویت‌کننده در قالب بتن الیافی می‌باشد. استفاده از افزودنی‌های بتن باعث بهبود خواص مطلوب بتن، همچون مقاومت آن می‌گردد و در بعضی موارد با کاهش وزن بتن، مصالح بسیار سبکی را در دسترس قرار می‌دهد.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بتن معمولی دارای تعداد زیادی ترک‌های موبین است. به دلیل توسعه سریع ترک‌های موبین تحت تنش‌های اعمال شده، مقاومت کششی بتن کم است. در ابتدا فرض می‌شد که با به کار بردن الیاف در فواصل نزدیک به یکدیگر، از توسعه ترک‌های موبین جلوگیری شده و در نتیجه مقاومت‌های کششی و خمشی بتن به میزان زیادی افزایش می‌یابد، همچنین الیاف شروع ترک‌های کششی را به تأخیر انداخته و در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود، اما مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که استفاده از الیاف با حجم و اندازه‌های مختلف در ملات یا بتن باعث افزایش مقاومت آن‌ها به میزان زیاد نمی‌گردد. با این وجود پژوهشگران، بهبود زیادی را در رفتار بتن‌های الیافی در مرحله پس از ترک خوردگی پیدا کرده‌اند، به عبارت دیگر، علی‌رغم آنکه مقاومت نهایی کششی به میزان زیادی افزایش نمی‌یابد، اما کرنش کششی در هنگام گسیختگی افزایش می‌یابد. در نتیجه، در مقایسه با بتن ساده، بتن‌های الیافی سخت‌ترند و در مقابل ضربه مقاومت بیشتری دارند.

۲- نحوه عملکرد بتن الیافی

هرگاه تغییر شکل مربوط به مقاومت خمشی نهایی بتن ساده زیادتر گردد، گسیختگی ناگهانی رخ می‌دهد، ولی از سوی دیگر، بتن الیافی حتی در تغییر شکل‌های بسیار بیشتر از تغییر شکل نظیر شکست در بتن ساده، به تحمل بارها ادامه می‌دهد. نتایج آزمایش نمونه‌های شکسته شده بتن الیافی نشان می‌دهد که در این نوع بتن‌ها شکست به علت بیرون کشیده شدن الیاف یا از بین رفتگی پیوستگی رخ می‌دهد. در نتیجه بر خلاف بتن ساده، نمونه بتن الیافی بلافاصله پس از شروع اولین ترک شکسته نمی‌شود. این رفتار تأثیر الیاف بر روی افزایش کار انجام شده تا هنگام شکست را، که طاقت نامیده می‌شود نشان می‌دهد. طاقت، با سطح زیر منحنی بار - تغییر شکل نشان داده می‌شود. بر اساس نظریه Shah مکانیزم افزایش طاقت بتن الیافی به شرح زیر است.

بتن الیافی، بعد از ایجاد اولین ترک در خمیر سیمان، بار وارده را تحمل می‌کند، به شرط آنکه مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن آن‌ها در اولین ترک، بیش از بار در هنگام وقوع اولین ترک باشد. در مقطع ترک خورده، خمیر سیمان هیچ کششی را تحمل نمی‌کند و الیاف تمام بار وارد بر مقطع مرکب را تحمل می‌کند. با افزایش بار بر روی مقطع مرکب، الیاف تمایل دارند که تنش‌های اضافی را از طریق تنش‌های پیوستگی به خمیر سیمان منتقل کنند. اگر این تنش‌های پیوستگی از مقاومت پیوستگی بیشتر نگردد در خمیر سیمان ترک‌های دیگری نیز به وجود می‌آید و این روند ترک خوردگی تا آنجا ادامه می‌یابد که الیاف شکسته شوند و یا اینکه به علت از بین رفتن پیوستگی، الیاف از درون بتن کشیده می‌شود.

۳- ویژگی‌های بتن الیافی

۳-۱- طاقت و مقاومت در برابر ضربه

مزیت عمده بتن الیافی، بهبود طاقت خمشی (کل انرژی جذب شده در هنگام شکست نمونه در خمش) است. به دلیل افزایش طاقت خمشی، مقاومت در برابر خستگی و مقاومت در برابر ضربه نیز به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. متأسفانه از آنجا که انجام آزمایش مقاومت ضربه‌ای برای بتن الیافی چندان موفقیت آمیز نبوده است لذا پژوهشگران تاکنون موفق به تعیین کمی میزان افزایش مقاومت ضربه‌ای نشده‌اند. در خصوص مقاومت نشان داده شده است که افزودن الیاف به تیرهای بتن آرمه معمولی عمر آن را در برابر خستگی افزایش می‌دهد و تحت بارگذاری خستگی، عرض ترک کاهش می‌یابد.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۳-۲- مدول ارتجاعی، خزش و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن

افزودن الیاف فولادی به بتن، اثر ناچیزی بر روی مدول ارتجاعی، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن و خزش فشاری دارد. خزش کششی تا حدی کاهش می‌یابد ولی اگر از الیاف کربنی خیلی قوی استفاده شود خزش خمشی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد، با این وجود در اکثر تحقیقات، الیاف به دلیل حجم کم آن فقط به عنوان یک ماده صلب درون خمیر عمل کرده‌است بدون آنکه اثر مهمی در پایداری ابعاد ماده مرکب داشته باشد.

۳-۳- دوام

معمولاً بتن مسلح با الیاف، با مقدار زیاد سیمان و نسبت کم آب به سیمان ساخته می‌شود. اگر بتن حاوی الیاف فولادی به‌طور مطلوبی متراکم شده و عمل آوری شود تا زمانی که الیاف توسط خمیر سیمان محافظت می‌شود، از دوام عالی برخوردار خواهد بود. در اکثر شرایط محیطی، به‌خصوص در محیط‌هایی که کلرید وجود دارد، امکان زنگ‌زدگی الیاف واقع در حوالی سطح بتن وجود دارد اما الیاف واقع در بخش درونی بتن بدون خوردگی باقی می‌مانند. آزمایش دراز مدت بر روی بتن حاوی الیاف فولادی در آزمایشگاهی در اوهایو نشان داد که الیاف دچار کمترین زنگ‌زدگی شده‌اند و پس از ۷ سال قرارگیری در معرض نمک‌های یخ‌زدا دچار کمترین مشکل شده‌اند (Grzymiski et al., 2019: 323-331).

همانطور که گفته شد، چون از طرفی بتن در کشش ضعیف بوده که این ضعف به وسیله‌ی میلگردها و فولادهای پیش‌تنیده جبران می‌شود و همچنین استفاده از میلگرد در همه‌جا امکان‌پذیر نبوده یا مقرون به‌صرفه نیست، لذا به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن تا حد امکان در چند دهه اخیر استفاده از الیاف که در تمام حجم بتن بصورت یکنواخت پراکنده می‌شود متداول شده است (وظیفه خواه و مناف پور، ۱۳۹۱: ۴۷-۵۶).

۴- الیاف مورد استفاده در بتن الیافی

با توجه به تنوع الیاف از لحاظ جنس، شکل، اندازه و... این پژوهش قصد دارد به بررسی و شناخت دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن که از کاربردی‌ترین و پرمصرف‌ترین الیاف‌های مورد استفاده در بازار روز جهانی هستند، بپردازد.

۴-۱- الیاف فولادی

الیاف فولادی در سازه، می‌تواند نقش مکملی برای میلگرد داشته باشد. الیاف فولادی با پخش ترک‌ها مقابله می‌کند و مقاومت بتن را در برابر خستگی، ضربه، جمع‌شدگی و تنش‌های حرارتی افزایش داده و بتن در همه مدهای شکست روی خواص مکانیکی بتن تأثیر مثبت می‌گذارد. تکنولوژی بتن پر مقاومت توسعه‌ای جدید در صنعت ساخت و سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. در بتن سخت شده مقاومت و دوام دو عامل اصلی بوده و هرچه مقاومت فشاری بتن بیشتر می‌شود بتن تردتر شده و در نتیجه مقاومت کششی آن به نسبت افزایش مقاومت فشاری افزایش نمی‌یابد و نیز از تحمل کرنش پایین‌تری برخوردار است. بدین دلیل نیاز به استفاده از الیاف در بتن پر مقاومت کاملاً مشهود است. جهت افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از گسترش ترک و به‌ویژه افزایش نرمی از الیاف در بتن استفاده می‌شود. مقدار افزایش با تغییر این مقاومت‌ها بستگی به مقاومت بتن بدون الیاف، شکل الیاف و درصد الیاف دارد.

بتن پر مقاومت شامل الیاف فولادی، ترکیبی است از سیمان، مصالح سنگی، آب، فوق روان‌کننده، دوده سیلیس و همچنین درصدی از الیاف فولادی که به‌طور درهم و کاملاً اتفاقی و در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده است. وجود الیاف فولادی مشخصات مکانیکی بتن را نسبت به حالت اولیه بهبود می‌بخشد. بتن پر مقاومت یک ماده ترد و شکننده است، در حالیکه

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

افزودن الیاف فولادی به بتن پر مقاومت سبب بهبود رفتار ترد بتن و تغییر مد شکست آن می‌گردد (سحرخیزان و سعیدی جم، ۱۳۹۴: ۱۲۹-۱۳۸).

۴-۲- الیاف پلی‌پروپیلن

این الیاف جهت کنترل ترک‌ها و بهبود ضعف بتن در کشش، افزایش مقاومت خمشی و افزایش مقاومت در برابر ضربه به مخلوط‌های بتنی اضافه می‌شوند. الیاف پلی‌پروپیلن به اختصار الیاف PP نیز نامیده می‌شوند. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط‌های بتن، موجب تأخیر در بروز ترک‌های انقباضی شده و عرض آن‌ها را کاهش می‌دهد. استفاده از این الیاف، سبب افزایش خاصیت جذب انرژی و مقاومت در برابر حریق می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های این مواد، می‌توان به افزایش دوام بتن اشاره نمود، ضمن آنکه امکان کاهش یا حذف بخشی از آرماتورها را فراهم می‌کند. الیاف پلی‌پروپیلن به دو صورت بازیافتی و غیر بازیافتی یافت می‌شوند. گونه بازیافتی این نوع الیاف به رنگ سیاه تولید می‌شوند و با توجه به بازیافتی بودن، عملکرد ضعیف‌تری در بتن دارند، اما با بتن کاملاً سازگار هستند. الیاف پلی‌پروپیلن یا الیاف PP در بتن مانع از نشت آب یا نفوذ آن می‌شود. به عبارت دیگر این مواد باعث کاهش تخلخل سطوح مخازن سبتیک و سدها می‌شوند. سازه‌های مجاور آب، در حضور فشار هیدرواستاتیک تحت تنش بسیار بالایی قرار می‌گیرند که معمولاً موجب ترک خوردن بتن می‌شود. این مواد به دلیل مقاومت کششی بالایی که دارند، در صورت حضور در بتن از بروز ترک در سازه‌های آبی جلوگیری می‌کنند و از این جهت سبب افزایش دوام و عمر سازه‌های بتنی مجاور آب می‌شوند. به طور کلی می‌توان الیاف بتن را در هنگام ساخت بتن و به صورت خشک با سایر مصالح مخلوط نمود. این روش، مناسب‌ترین شیوه اختلاط الیاف پلی‌پروپیلن با مصالح دیگر و بتن است. نکته مهم در استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن آن است که این مواد همراه با افزودنی‌های کاهنده آب یا روان کننده‌ها به بتن اضافه شوند تا امکان اختلاط و پخش مناسب الیاف پلی‌پروپیلن در بتن فراهم شود.

برخی مجریان هنگام بتن‌ریزی به این موضوع توجه نمی‌کنند و در هنگام ریختن بتن در قالب سعی می‌کنند با ویریه زدن بیشتر، کارایی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بتن را جبران کنند که این کار سبب آب‌انداختگی بتن می‌شود. گفتنی است الیاف پلی‌پروپیلن در محل پروژه قابل استفاده است و می‌توان آن را به تراک میکسر اضافه کرد. باید دقت شود در این حالت حتماً پس از افزودن الیاف به بتن درون تراک میکسر، از دور تند میکسر استفاده شود تا بتوان نسبت به اختلاط کامل و پخش یکنواخت الیاف در بتن اطمینان حاصل نمود (سحرخیزان و سعیدی جم، ۱۳۹۴: ۱۲۹-۱۳۸).

۵- ارزیابی مقاومت فشاری بتن با الیاف

آزمایش تعیین مقاومت فشاری یک آزمایش متداول در مورد کیفیت بتن سخت شده است (سحرخیزان و سعیدی جم، ۱۳۹۴: ۱۲۹-۱۳۸). در این آزمایشی که صورت گرفته است از نمونه ی مکعبی ۱۵ سانتی متری با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) استفاده شده است و جهت عمل آوری از حوضچه آب با دمای حدوداً ۲۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردیده است، همچنین در سنین ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها از آب خارج شده و آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها صورت گرفته است (شکل (۱)).

نام گذاری نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق

N: نمونه بتن بدون الیاف

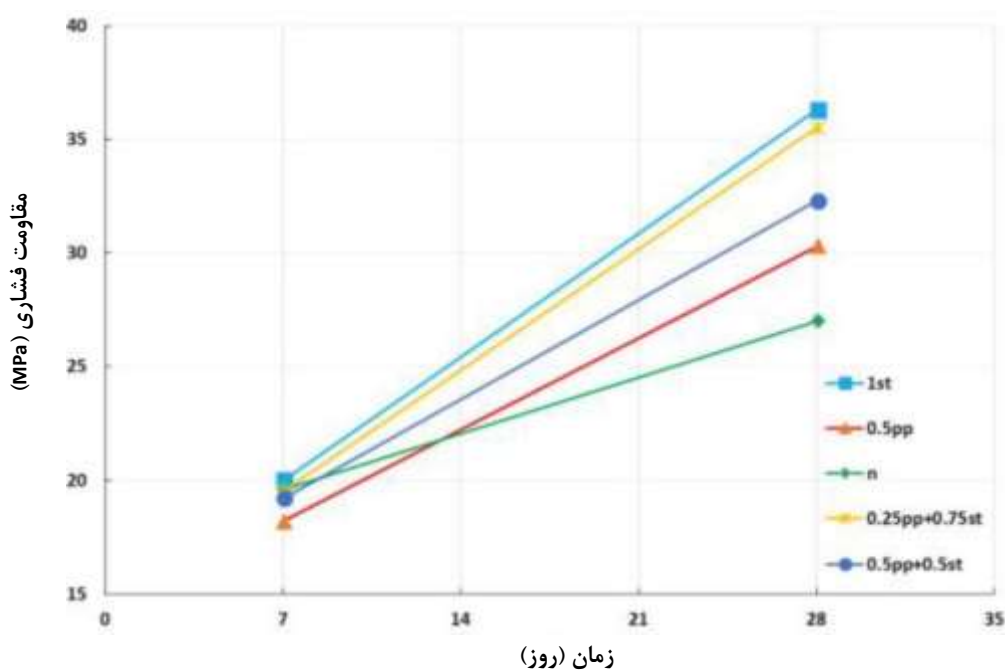
PP: بتن با الیاف پلی‌پروپیلن

St: بتن با الیاف فولادی

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

جدول (۱) مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق

نام نمونه	نوع بتن	پلی پروپیلن (%)	فولادی (%)
N	معمولی	۰	۰
0.5PP	الیافی	۰/۵	۰
0.5PP+0.5St	الیافی	۰/۵	۰/۵
0.25PP+0.75St	الیافی	۰/۲۵	۰/۷۵
1St	الیافی	۰	۱



شکل (۱) روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها با درصد الیاف‌های مختلف

۵-۱- علل کاهش مقاومت فشاری

در برخی نمونه‌های با الیاف در مقاومت فشاری ۷ روزه شاهد کاهش مقاومت بوده‌ایم که دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزودن الیاف، آب‌انداختن و خروج آب‌ها از بتن کم شده‌است و بتن تا مدت بیشتری حالت خمیری داشته و سخت شدن بتن به تاخیر می‌افتد (سرخیزان و سعیدی جم، ۱۳۹۴: ۱۲۹-۱۳۸).

۶- ارزیابی مقاومت کششی بتن با الیاف

برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها از آزمایش برزیلی مطابق روش استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه استوانه‌ای صورت گرفته است (شکل (۲)).

شرایط نگهداری و عمل‌آوری این نمونه‌ها همانند نمونه‌های فشاری می‌باشند (Grzymiski et al., 2019: 323-331).

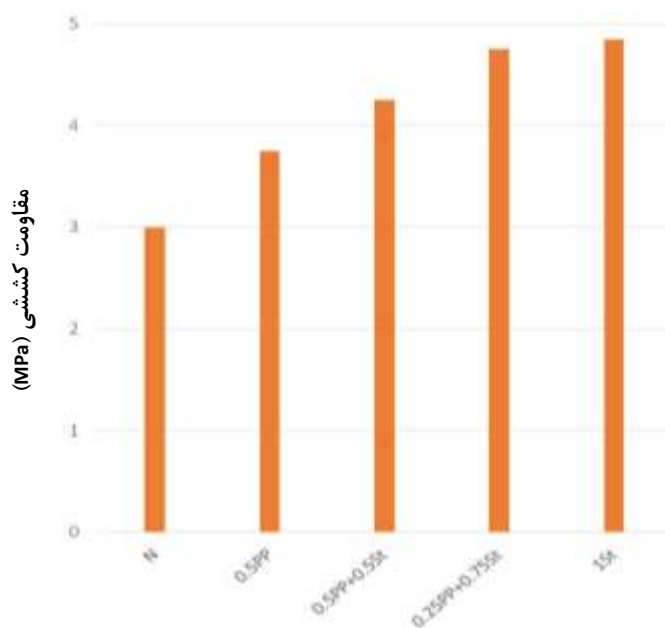
شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل (۲) نحوه قرارگیری نمونه زیر دستگاه برزیلی

۱-۶- نتیجه آزمایش مقاومت کششی

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی به بتن معمولی در تمامی درصدها سبب افزایش مقاومت کششی شده و بیشترین افزایش مقاومت کششی مربوط به نمونه‌ی حاوی یک درصد الیاف فولادی بوده است.



نمونه‌های مورد بررسی

شکل (۳) مقایسه مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف با درصدهای مختلف

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۷- نتیجه گیری

- ۱- آزمایش‌های مقاومت کششی و فشاری انجام شده بر روی نمونه‌های حاوی الیاف با درصدهای مختلف نشان داد که افزودن الیاف در سن ۲۸ روزه موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی می‌گردد.
- ۲- بیشترین تأثیر مقاومتی در نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف فولادی و بعد از آن نمونه‌ی ترکیبی ۰/۷۵٪ فولاد و ۰/۲۵٪ پلی‌پروپیلن مشاهده شد.
- ۳- مطابق جدول (۲) مقاومت فشاری بتن با الیاف در سن ۲۸ روزه نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است.

جدول (۲) درصد افزایش مقاومت فشاری بتن با الیاف

شماره	نام طرح	درصد افزایش
۱	0.5 PP	۱۳
۲	0.5PP+0.5St	۲۰
۳	0.25PP+0.75 St	۳۱
۴	1 St	۳۵

- ۴- مطابق جدول (۳) مقاومت کششی بتن با الیاف نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است.

جدول (۳) درصد افزایش مقاومت کششی بتن با الیاف

شماره	نام طرح	درصد افزایش
۱	0.5PP	۳۰
۲	0.5PP+0.5St	۴۵
۳	0.25PP+0.75 St	۶۲
۴	1 St	۶۳

مراجع

۱. سحرخیزان سروش، سعیدی‌جم، سعید، بررسی ویژگی مکانیکی بتن حاوی الیاف ترکیبی فولادی و پلی‌پروپیلن، تحقیقات بتن، سال هشتم، شماره دوم، صص ۱۲۹ - ۱۳۸، ۱۳۹۴.
۲. وظیفه خواه نیما، مناف پور علیرضا، تاثیر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر مقاومت کششی بتن‌های الیافی با مقاومت زمینه یکسان، مهندسی عمران و محیط زیست، جلد چهل و دوم، شماره چهارم، صص ۴۷ - ۵۶، ۱۳۹۱.
3. Grzyski, F, Musiał, M and Trapko, T. (2019). *Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibres*, Construction and Building Materials. Vol 198, pp. 323-331.