



تاثیر ایفام امباس (پلی پروپیلن اصلاح شده) بر رفتار بتن مورد استفاده در روسازی های بتنی

مسعود غلامی^۱، فریدون مقدس نژاد^{۱*}، علی اکبر رمضانپور^۱، امیرمحمد رمضانپور^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱

کلمات کلیدی:

روسازی بتنی

جمع شدگی ناشی از خشک شدن

ایفام امباس

ترک های مویی

ایفام پلی پروپیلن

خلاصه: کاهش منابع نفتی، طول عمر پایین و نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری بیشتر روسازی های آسفالتی، استفاده از روسازی بتنی را در ایران و جهان مورد توجه قرار داده است. پدیده جمع شدگی و ترک های ناشی از آن یکی از مشکلات جدی روسازی های بتنی است که کنترل کننده فاصله بین درزهای طولی و عرضی (ابعاد دال) است. ایفام از جمله موادی است که با هدف کنترل جمع شدگی و عرض ترک های ناشی از آن مورد استفاده قرار می گیرند. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر استفاده از ایفام پلی پروپیلن بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی روسازی های بتنی است. به همین منظور آزمایش های اسلامپ، مقاومت فشاری، خمشی، الکتریکی، اصطکاک سطحی، جمع شدگی های آزاد و مقید بر روی بتن شاهد و بتن ایفامی حاوی ایفام به میزان ۰/۴۴ درصد حجمی بتن در دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ انجام گردید. نتایج حاکی از آن است که استفاده از ایفام پلی پروپیلن موجب کاهش اسلامپ و کارایی بتن گردید. همچنین تاثیر این نوع ایفام در نسبت های مختلف آب به سیمان در مقاومت های فشاری، خمشی و الکتریکی متفاوت بود، با این حال ایفام پلی پروپیلن سبب افزایش تا حدود سه برابری انرژی جذب شده در آزمایش خمش سه نقطه ای شده است. به علاوه کاهش حدود ۱۰ درصدی در میزان جمع شدگی مقید، کاهش ۲۰ درصدی جمع شدگی آزاد بتن، کاهش سن ترک خوردگی و کاهش ۳۵ درصدی عرض ترک نتیجه استفاده از ایفام پلی پروپیلن بوده است. قابل ذکر است که تاثیر ایفام بر خروجی های اصطکاک سطحی چندان واضح و مشخص نبود.

۱- مقدمه

این حال در این پژوهش پدیده جمع شدگی مورد توجه قرار گرفته که جزئی از ذات بتن است و در مقایسه با تغییر شکل های حرارتی به صورت عمده و وسیع با اجرای صحیح قابل کنترل نیست (خصوصاً در بلند مدت). پدیده جمع شدگی در اثر خروج آب موجود در حفرات بتن، استفاده از آب موجود در فرآیند هیدراسیون و یا تغییرات حجمی عناصر موجود در بتن ایجاد شده و بنابراین به چهار حالت جمع شدگی پلاستیک، خود به خودی، ناشی از خشک شدن و کرناسیون بروز پیدا می کند. در این بین جمع شدگی ناشی از خشک شدن در روسازی های بتنی از اهمیت بیشتری برخوردار است که به علت فرارگیری در محیط با رطوبت کمتر از حالت اشباع ایجاد می شود [۳]. کشش مویینه، فشار جدا کننده و تغییرات انرژی آزاد از جمله مکانیزم هایی است که موجب جمع شدگی ناشی از خشک شدن می گردد [۴]. در سال ۲۰۰۶ پژوهشی به منظور اندازه گیری و آنالیز تنش و کرنش در سنین اولیه روسازی های بتنی پیوسته مسلح تحت شرایط محیطی انجام شد. از جمله نتایج این پژوهش، تاثیر قابل توجه جمع شدگی بر عملکرد و طول عمر روسازی بتنی مسلح

امروزه ترجیح مهندسین استفاده از روسازی هایی با طول عمر بالا (حدود ۵۰ سال) می باشد. روسازی بتنی به دلیل طول عمر بالا و نیاز به انجام عملیات تعمیر و نگهداری کمتر، با گذشت زمان شرایط مطلوب تری را نسبت به روسازی آسفالتی فراهم می کند [۱]. با این حال هزینه اولیه ساخت روسازی های بتنی (مخصوصاً از نوع مسلح) از روسازی های آسفالتی بالاتر بوده و نیازمند تخصیص بودجه بیشتر به منظور احداث آن می باشد که غالباً دلیل این افزایش هزینه ساخت، حضور فولاد، مش و یا میلگردهای انتظار موجود در محل درزها است [۲]. پدیده جمع شدگی و تغییر شکل های حرارتی از عوامل اصلی کنترل کننده ابعاد دال های بتنی می باشد که در صورت عدم کنترل آن ها به نحو مناسب، استفاده از میلگردها و یا کاهش ابعاد دال های بتنی مورد استفاده در روسازی های بتنی اجتناب ناپذیر می باشد. با توجه به آن که تغییر شکل های حرارتی نیز نقش عمده ای را در این زمینه ایفا می کنند با

* نویسنده عهده دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir



فشاری را اعلام و علت آن را سخت شدن امکان رسیدن به تراکم مناسب در بتن یافی دانستند. به علاوه آن‌ها دریافتند با استفاده از الیاف، نرخ تبخیر آب افزایش یافته و ترک‌های اولیه زودتر به وقوع می‌پیوندند. با این حال استفاده از الیاف موجب کاهش طول، عرض و مساحت ترک شده است و همچنین نسبت ابعاد الیاف، تاثیر چندانی بر میزان طول کلی ترک ندارد. رمضانپور و همکاران [۱۰] تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن را بر خصوصیات دوامی، فیزیکی و مکانیکی بتن هدف قرار داده و مشاهده کردند استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. همچنین تا ۰/۷ کیلوگرم استفاده از این نوع الیاف در یک متر مکعب بتن، مقاومت کششی و خمشی بهبود و برای مقادیر بالاتر کاهش می‌یابد. آن‌ها افزایش تخلخل در بتن بدون تغییر در اندازه ژل CSH^2 ، افزایش درصد هوای ناحیه انتقالی و ضعف در نواحی متخلخل را از عوامل موثر بر کاهش خصوصیات مکانیکی بتن دانستند. افروغ ثابت و همکاران [۱۶] بررسی مشابهی روی بتن توانمند حاوی الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن انجام دادند. آن‌ها بهبود مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن با استفاده از هر دو نوع الیاف، گزارش کردند و دلیل آن را به کنترل ریز ترک‌ها، کاهش تمرکز تنش، محدود کردن ترک‌ها و ایجاد تاخیر در رشد آن‌ها نسبت دادند. کاکویی و همکاران [۱۷]، بهبود مقاومت فشاری بتن با سنگدانه سیلیسی و حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را نسبت به بتن شاهد گزارش کردند و علت آن را ممانعت از گسترش ترک‌ها به دلیل برقراری پل در دو سمت ترک دانستند. به علاوه این پژوهشگران، بهبود مقاومت الکتریکی بتن را در نتیجه استفاده از الیاف گزارش دادند. باررا^۱ و همکاران [۱۸] در پژوهشی دیگر خصوصیات بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را پس از تابش اشعه گاما بررسی کرده و درصد بهینه از منظر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن یافی را ۱/۵ درصد اعلام داشتند. وانگ^۲ و همکاران [۱۹] در پژوهش خود به بررسی تاثیر الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن بر مشخصات مکانیکی بتن‌های توانمند پرداختند. آن‌ها ملاحظه کردند که افزایش درصد مصرفی هر دو نوع الیاف سبب بهبود مشخصات مکانیکی بتن می‌گردد با این تفاوت که افزایش مقاومت فشاری بتن توانمند یافی جزئی و افزایش مقاومت‌های خمشی و کششی قابل توجه است. همچنین زاهدحسین^۳ و همکاران [۲۰] به بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن و خرده لاستیک در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بر مشخصات مکانیکی آن پرداختند. آن‌ها اظهار داشتند که استفاده از الیاف

و لزوم در نظر گرفتن آن می‌باشد [۵]. همچنین تابیدگی یکی از مشکلات اصلی روسازی‌های بتنی می‌باشد که اختلاف دما در سطح زیرین و روی لایه روسازی یکی از علل ایجاد این نوع خرابی می‌باشد [۶]. جمع شدگی ناشی از خشک شدن یکی دیگر از علل اصلی وقوع پدیده تابیدگی می‌باشد که از طرفی به صورت جدی به دال‌های بتنی روسازی‌ها آسیب وارد کرده و موجب خرابی در آن‌ها می‌شود و از طرفی دیگر می‌تواند بر شرایط تکیه گاهی روسازی تاثیر گذارد [۷]. همچنین تابیدگی و جدا شدگی اتصال پیوسته روکش‌های بتنی به بزرگی و نرخ جمع شدگی وابسته است [۸]. همچنین ترک‌های جمع شدگی بر ظرفیت تحمل پذیری روسازی بتنی موثر است، به این صورت که با افزایش سن روسازی‌های بتنی و بارگذاری آن‌ها، عمق و عرض این نوع ترک‌ها گسترش می‌یابد. با افزایش عمق این ریزترک‌ها به میزان ۲۵ درصد ضخامت دال، کاهش حدود ۵۰ درصدی ظرفیت روسازی مشاهده می‌گردد [۹]. الیاف از جمله موادی است که به عنوان مسلح کننده بتن به منظور کنترل عرض ترک‌ها (خصوصاً ترک‌های جمع شدگی) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

عملکرد الیاف در بتن به این صورت است که این ماده با اجزای بتن و سیمان پیوند شیمیایی تشکیل نمی‌دهد [۱۰]، بلکه به عنوان پلی به منظور انتقال نیرو پس از ترک خوردگی عمل می‌کند [۱۳-۱۰]. پژوهش‌هایی به منظور بررسی تاثیر این ماده بر بتن صورت گرفته است. چیلوسا^۱ و همکاران [۸] پژوهشی بر روی المان‌های مسلح دال در روکش‌های پیوسته به منظور تعیین اثر جمع شدگی بر تابیدگی و ناپیوسته شدن انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند استفاده از الیاف عرض ترک را کاهش می‌دهد، اما تغییری در زمان ترک خوردگی حادث نمی‌شود. هسی^۲ و همکاران [۱۱] کاهش اسلامپ بتن یافی (که نسبت آب به سیمان آن برابر با ۰/۶۴ در نظر گرفته شده بود) را به علت جذب بیشتر خمیر سیمان توسط الیاف و افزایش ویسکوزیته آن گزارش کردند. همچنین در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، علت بهبود جمع شدگی ناشی از خشک شدن، ایجاد اتصال بین لایه‌های المان بتنی اعلام شده است. اولوی^۳ و همکاران [۱۴] ایجاد موانع توسط الیاف در مقابل جابه‌جایی مصالح و اجزای بتن را علت کاهش اسلامپ دانستند. ارن^۴ و مارار^۵ [۱۵] در پژوهشی به بررسی تاثیر الیاف فلزی بر جمع شدگی پلاستیک بتن توانمند در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵۴ و ۰/۴۳ پرداختند و کاهش مقاومت

6 Calcium silicate hydrate
7 Barrera
8 Wang
9 Zahid hossain

1 Chilwesa
2 Hsei
3 Olaoye
4 Eren
5 Marar

تاثیر حضور یا عدم حضور الیاف نمی‌باشد. بررسی اثر الیاف پلی‌پروپیلن بر جمع شدگی بتن سرامیکی از پژوهش‌هایی بود که گونگ^۵ و همکاران [۲۶] بدان پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش جمع شدگی خود به خودی و جمع شدگی ناشی از خشک شدن در بتن می‌گردد. همانطور که ادبیات موضوع مشاهده گردید، تاثیر ضد و نقیض الیاف بر خصوصیات مکانیکی بتن در ادبیات موضوع که حاکی از دو نوع دیدگاه مختلف می‌باشد از جمله موارد مورد اختلاف است. در دیدگاه اولیه، الیاف به دلیل ایجاد مشکلات تراکم و همگنی مشخصات مکانیکی را کاهش می‌دهد و دیدگاه دوم بهبود مشخصات مکانیکی را به علت کنترل عرض ریزترک‌ها و ممانعت از گسترش آن‌ها اظهار می‌نماید. با توجه به تاثیر مثبت الیاف در کاهش عرض ترک‌های ناشی از جمع شدگی در بتن، استفاده از آن در روسازی‌های بتنی می‌تواند به افزایش ابعاد دال‌های بتنی پیش ساخته و یا افزایش فاصله بین درزهای انقباضی کمک شایانی کند که این عامل به سرعت اجرا و سادگی کار می‌افزاید. عدم بررسی الیاف ساخت داخل با توجه به شرایط تحریمی و بررسی امکان برقراری ارتباط بین جمع شدگی مقید و آزاد بتن نیز می‌تواند از دیگر دلایل این موضوع باشد. بنابراین در صورتی که الیاف داخلی مورد استفاده در بتن بتواند در کنار حفظ خواص مکانیکی و دوامی، پدیده جمع شدگی ناشی از خشک شدن را بهبود بخشد و عرض ترک‌های ناشی از آن را کنترل کند، شرایط مطلوبی برای استفاده در بتن روسازی‌ها پیش روی مهندسان قرار خواهد داد. به همین دلیل، این پژوهش بررسی اثر الیاف امباس بر خصوصیات مکانیکی و جمع شدگی را هدف قرار داده است تا علاوه بر حصول اطمینان از عملکرد الیاف بر خواص مکانیکی و دوامی بتن، پدیده جمع شدگی ناشی از خشک شدن نیز مورد بررسی قرار گیرد.

۲- برنامه آزمایش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

سیمان پرتلند نوع دو شرکت سیمان تهران با جرم حجمی 3130 kg/m^3 در این پژوهش، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مربوط به آنالیز شیمیایی در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین درصد چهار ترکیب اصلی موجود در سیمان در جدول ۲ آورده شده و قابل مشاهده می‌باشد.

همچنین در این پژوهش از سنگدانه‌های شکسته با سه اندازه بهره گرفته شد، ابعاد و درصد استفاده از مصالح به این صورت بود که ماسه

پلی‌پروپیلن موجب کاهش اسلامپ و افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن می‌گردد. همچنین شکل پذیری بتن در صورت افزودن الیاف به آن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که تاثیر آن در افزایش استهلاک انرژی در بتن الیافی است. بررسی تاثیر پودر لاستیک بر خواص مکانیکی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن توسط مو^۱ و همکاران [۲۱] صورت گرفت. آن‌ها در این پژوهش عنوان کردند که افزودن الیاف تاثیر ضد و نقیضی بر مقاومت فشاری بتن می‌گذارد. همچنین استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن موجب افزایش انرژی مورد نیاز تراکم و ضعف در پیوند میان خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌گردد. همچنین مستهلک ساختن انرژی و افزایش شکل پذیری بتن الیافی، از دیگر نتایج استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن می‌باشد. باقرزاده و همکاران [۱۲] مشاهده کردند، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش عرض و مساحت ترک به علت برقراری پل توسط این ماده در دو سمت ترک و همچنین جذب انرژی توسط آن‌ها می‌شود. آن‌ها همچنین بیان کردند که با افزایش درصد استفاده از الیاف، میزان جمع شدگی مقید و آزاد کاهش می‌یابد. جمالی [۲۲] نیز در پایان نامه ارشد خود بیان کرد که الیاف بر زمان ترک خوردگی تاثیر چندانی ندارد، اما در مقابل موجب کاهش عرض ترک می‌گردد. کیانی و بخشی [۲۳] در تشریح آزمایش‌های خود اظهار داشتند که استفاده از الیاف موجب کاهش جمع شدگی پلاستیک و مساحت ترک‌های حاصل از آن می‌شود و همچنین زمان وقوع اولین ترک را به تاخیر می‌اندازد. در واقع الیاف همانند مسیرهای آب انداختگی عمل کرده و آب لازم برای پوشش سطوح خشک و کاهش تنش کششی لوله‌های مویین را فراهم می‌کند. کاهش تنش کششی در لوله‌های مویین مانع نزدیک شدن جداره‌های آن‌ها به یکدیگر و کاهش جمع شدگی بتن می‌شود. بادوگیانیس^۲ و همکاران [۲۴] به کاهش شکل‌گیری و گسترش ترک‌ها در پژوهش خود اشاره و دلیل آن را اتصال تکه‌های بتن پس از ترک خوردگی توسط این مواد دانستند. همچنین تاخیر در وقوع جمع شدگی و همچنین کاهش مقدار آن با استفاده از الیاف به چشم می‌خورد. شاه^۳ و ویس^۴ [۲۵] ترک‌های جمع شدگی در بتن الیافی با استفاده از آزمایش حلقه را در دستور کار خود قرار دادند. تاخیر در سن ترک خوردگی از جمله نتایج استفاده از الیاف فلزی در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ بود که دلیل آن، توانایی این الیاف در کنترل ترک‌ها پیش از ناپایدار شدن است. همچنین گزارش شد که جمع شدگی آزاد، چندان تحت

- 1 Mo
- 2 Badogiannis
- 3 Shah
- 4 Weiss

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان

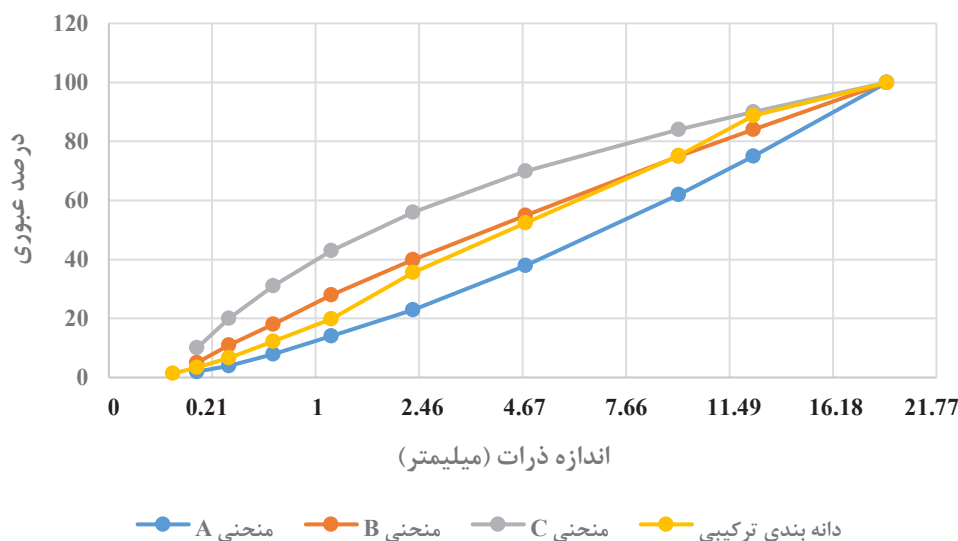
Table 1. Results of Chemical Analysis of Cement

K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۰/۵۳	۰/۱۸	۱/۷۵	۳/۶	۶۳/۰۱	۳/۵۲	۴/۵۶	۲۱/۸۴	سیمان (%)
-	-	۳/۰۰ >	۵/۰۰ >	-	۶/۰۰ >	۶/۰۰ >	> ۲۰/۰۰	الزامات استاندارد ۳۸۹
دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	انطباق با استاندارد

جدول ۲. درصد چهار ترکیب اصلی موجود در سیمان

Table 2. Percentage of four main mineral phases of Cement

C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	ترکیبات اصل سیمان
۱۰/۷	۶/۱۳	۲۵/۳۳	۴۹/۸	درصد ترکیبات در سیمان



شکل ۱. دانه بندی ترکیبی مصالح سنگی مورد استفاده در طرح های بتنی بر مبنای طرح ملی اختلاط بتن

Fig.1. Grading of aggregates in this research based on National Method for Concrete Mix Design

مجاز آیین نامه ای قرار گرفته اند. همچنین شکل ۱ دانه بندی ترکیبی مصالح سنگی با درصدهای ذکر شده را نشان می دهد. لازم به ذکر است منحنی های A، B و C به ترتیب بیانگر دانه بندی درشت، متوسط و ریز می باشد. به علاوه وزن مخصوص مصالح سنگی مصرفی و درصد جذب آب آن ها نیز در جدول ۳ آورده شده است.

با اندازه ۰-۶ میلی متر به میزان ۵۵ درصد، شن ریز با ابعاد ۶-۱۲ میلی متر به میزان ۲۵ درصد و شن درشت با ابعاد ۱۹-۹/۵ میلی متر به میزان ۲۰ درصد مورد استفاده قرار گرفت. دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در محدوده دانه بندی موجود در روش طرح ملی اختلاط می باشد و اجزای سازنده هر یک از سه مصالح مصرف شده در محدوده

جدول ۳. جرم حجمی و جذب آب سنگدانه‌های مصرفی

Table 3. Density and Water absorption of each types of aggregates

نوع سنگدانه	ماسه	شن ریز (۶-۱۲)	شن ریز (۱۹-۹/۵)
جرم حجمی SSD (gr/cm ³)	۲/۴۹	۲/۶۵	۲/۶۷
جذب آب (درصد)	۲/۸۵	۲/۴	۲

جدول ۴. مشخصات الیاف امباس (پلی پروپیلن اصلاح شده) بررسی شده در این پژوهش

Table 4. The Properties of Emboss fiber that used in this study

نام	مواد سازنده	شکل	جذب آب	وزن مخصوص	مقاومت کششی	مدول الاستیسیته
الیاف امباس	پلی پروپیلن	الیاف کبریتی طوسی	ندارد	۰/۹۱ gr/cm ³	۴۵۰-۷۰۰ مگاپاسکال	۷۰۰۰-۳۵۰۰ مگاپاسکال

جدول ۵. اجزاء مختلف به همراه مقادیر آن‌ها در ساخت طرح‌های مورد مطالعه

Table 5. The Reference Mix Compositions based on National Method for Concrete Mix Design

ردیف	نام طرح	W/C	سیمان (kg)	شن درشت (kg)	شن ریز (kg)	ماسه (kg)	آب (kg)	فوق روان کننده (kg)	الیاف پلی پروپیلن (kg)	اسلامپ (mm)
۱	OPC 0.35	۰/۳۵	۴۰۰	۳۷۵/۶	۴۶۹/۵	۱۰۳۲/۸	۱۴۰	۲	۰	۶۳
۲	FIBER 0.35	۰/۳۵	۴۰۰	۳۷۵/۶	۴۶۹/۵	۱۰۳۲/۸	۱۴۰	۳	۴	۶۸
۳	OPC 0.4	۰/۴	۴۰۰	۳۶۵/۳	۴۵۶/۶	۱۰۰۴/۶	۱۶۰	۱/۶	۰	۶۰
۴	FIBER 0.4	۰/۴	۴۰۰	۳۶۵/۳	۴۵۶/۶	۱۰۰۴/۶	۱۶۰	۱/۶	۴	۵۲

۲-۲- مشخصات طرح مخلوط نمونه‌ها

مخلوط‌های بتنی در دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ ساخته شدند که عیار سیمان در هر دو نسبت ثابت و برابر با ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. همانطوری که پیشتر اشاره شد، الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۴۴ درصد حجمی بتن مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر اجزای مختلف ۴ طرح بتنی در نظر گرفته شده در جدول ۵ ارائه شده است. توجه شود که وزن سنگدانه‌ها در حالت SSD گزارش شده است. همچنین اسامی مربوط به

به منظور دستیابی به اسلامپ محدوده ۵۰-۹۰ میلی متری، از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلاتی استفاده شده است.

الیاف مورد استفاده در این پژوهش، الیاف پلی پروپیلن می باشد. اندازه متوسط این الیاف حدود ۳۰ تا ۴۰ و قطر آن‌ها ۰/۳۵-۰/۳ میلی متر می باشد. همچنین سایر مشخصات این نوع الیاف در جدول ۴ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که طرح‌های بتن الیافی ساخته شده حاوی ۰/۴۴ درصد حجمی بتن از این نوع الیاف است.

کند. بنابراین تعداد نمونه‌های مقاومت فشاری هر طرح ۹ نمونه و تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۳۶ نمونه است. همچنین نمونه‌ها تا رسیدن به سن آزمایش، در محلول آب اهک اشباع نگهداری شدند.

۲-۳-۲- مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C293 [۲۸] به کمک نمونه‌هایی با ابعاد $285 \times 75 \times 75$ میلی‌متر مکعب انجام پذیرفت. هر نمونه در دو لایه قالب‌گیری و هر لایه به کمک میز لرزان متراکم گردید. تعداد نمونه‌های مقاومت خمشی هر طرح ۹ نمونه و تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۳۶ نمونه است. همچنین نرخ بارگذاری برابر با $1/2$ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین به منظور تعیین شاخص چقرمگی (میزان انرژی جذب شده توسط بتن الیافی) بر اساس استاندارد ASTM C 1018 [۲۹] عمل شده است. به این صورت که شاخص‌های سختی I_5 ، I_{10} و I_{20} و همچنین شاخص‌های $R_{10,5}$ و $R_{20,10}$ که شاخص مقاومت باقی‌مانده نامیده می‌شود، تعیین و بررسی گردید. به این صورت که شاخص‌های سختی I_5 ، I_{10} و I_{20} که به ترتیب برابرند با نسبت سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان در هنگام تغییر مکان ۳، ۵/۵ و ۱۰/۵ برابر δ (تغییر مکان تا وقوع اولین ترک در بتن) به سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان تا وقوع اولین ترک. همچنین شاخص‌های $R_{10,5}$ و $R_{20,10}$ که شاخص مقاومت باقی‌مانده نامیده می‌شود، طبق این استاندارد و به ترتیب بر اساس کمک روابط $(I_{10}-I_5)20$ و $(I_{20}-I_{10})10$ تعیین می‌گردد.

۲-۳-۳- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بر اساس استاندارد FM 5-578 [۳۰] صورت پذیرفته است. نحوه اندازه‌گیری به این صورت است که هر نمونه از هر چهار وجه و هر وجه حداقل دوبار به دستگاه متصل شده و مقاومت الکتریکی ویژه اندازه‌گیری و در نهایت مقاومت الکتریکی هر نمونه برابر است با میانگین قرائت‌های صورت پذیرفته که در انتهای آزمایش گزارش شده است. تعداد نمونه‌های مقاومت الکتریکی هر طرح ۹ نمونه و تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۳۶ نمونه است. با توجه به غیر مخرب بودن این آزمایش و همچنین مقایسه میان دو نوع بتن مختلف، از نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی جهت تعیین مقاومت الکتریکی استفاده شده است.

طرح‌ها از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اول شامل ماده مورد استفاده در آن‌ها است به این صورت که طرح‌های شاهد و الیافی به ترتیب با عناوین OPC و FIBER نام‌گذاری شده‌اند. قسمت دوم نیز بیانگر نسبت آب به سیمان طرح‌های ذکر شده است. توجه شود در طرح اختلاط فعلی، محدوده اسلامپ ۷۰-۵۰ میلی‌متر به عنوان محدوده قابل قبول در نظر گرفته شده است. با توجه به آن که الیاف باعث کاهش اسلامپ بتن می‌گردد در نسبت آب به سیمان $0/35$ مقدار فوق روان کننده افزایش یافته تا اسلامپ در محدوده مورد نظر قرار گیرد. همچنین در نسبت آب به سیمان $0/4$ ، مقدار اسلامپ در محدوده مورد نظر قرار گرفت و به همین دلیل مقدار فوق روان کننده افزایش پیدا نکرد. علت این اقدام آن بود که در این مجموعه آزمایش‌ها و مطالعات بتوان تاثیر استفاده از الیاف بر بتن در این دو حالت دیده شود.

همچنین الیاف در چند مرحله به بتن اضافه گردید تا همگنی این ماده در بتن تضمین گردد و همچنین از گلوله شدن الیاف‌ها در بتن که امری رایج در آزمایشگاه‌ها می‌باشد، پیشگیری شود. به این صورت که در صورتی که الیاف‌ها به یکدیگر چسبیده بودند، از هم جدا شدند، سپس در هنگام اختلاط بتن یک سوم الیاف مصرفی در مرحله اول اختلاط (اختلاط سخت) به شن و نیمی از ماسه و یک سوم آب اضافه گردید، پس از پایان اختلاط سخت، مابقی ماسه و آب به همراه سیمان مصرفی و فوق روان کننده به مواد موجود در میکسر اضافه شد و یک سوم بعدی الیاف نیز درون میکسر اضافه شد و سپس فرآیند اختلاط ادامه یافت. در مرحله آخر مابقی الیاف به مخلوط اضافه گردید و پس از آوردن مخلوط به وسط میکسر مجدداً اختلاط ادامه می‌یابد. با این کار، الیاف به خوبی در بتن پخش می‌گردد.

۲-۳-۳- آزمایش‌های انجام گرفته

آزمایش‌های مکانیکی برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، آزمایش‌های جمع شدگی آزاد تا سن ۱۰۰ روز و نیز آزمایش جمع شدگی مقید تا سن ۶۰ روز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ملی به شماره ۳-۱۶۰۸ [۲۷] صورت پذیرفت. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب بوده است و نمونه‌ها هنگام قالب‌گیری در دو لایه و هر لایه به کمک میز لرزان متراکم گردید. تعداد نمونه‌های ساخته شده همچنین باید برای انجام آزمایش سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ کفایت



شکل ۲. دستگاه پاندول انگلیسی

Fig.2. Pendulum Skid Resistance Tester

۲-۳-۴- اصطکاک سطحی

شده‌اند. تعداد نمونه‌های مورد نیاز جهت تعیین جمع شدگی آزاد هر طرح ۳ نمونه و تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۱۲ نمونه است. نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب، در آب آهک اشباع شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۳۰ دقیقه نگهداری شده و پس از آن طول اولیه نمونه به کمک دستگاه مربوطه اندازه‌گیری گردید. بعد از قرائت طول اولیه مجدداً نمونه را درون آب آهک اشباع قرار داده تا زمانی که سن نمونه به ۲۸ روز از زمان ساخت برسد. قرائت نمونه مجدداً انجام پذیرفته و پس از آن، نمونه‌ها به محفظه با رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای ۲۳ درجه منتقل شده و تغییرات به صورت هفتگی یادداشت شده است.

۲-۳-۶- جمع شدگی مقید

آزمایش جمع شدگی مقید استاندارد ASTM C1581 [۳۳] مورد استفاده قرار گرفته است. قالب نمونه از دو حلقه فولادی داخلی و بیرونی تشکیل شده است که حلقه فلزی داخلی دارای قطر خارجی ۳۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین حلقه خارجی دارای قطر داخلی به اندازه ۴۰۵ میلی‌متر بوده و روی پایه‌ای که باید از جنس مصالح غیرقابل جذب باشد (به این دلیل که بتن به آن نچسبد یا آب موجود در ساختار بتن جذب آن نشود)، قرار می‌گیرند. بتن در دو لایه تقریباً برابر در قالب ریخته شده و به هر لایه توسط میله‌ای با قطر ۱۰ میلی‌متر به تعداد ۷۵ ضربه وارد

آزمایش اصطکاک سطحی بر اساس BS_EN ۱۳۰۳۶-۴ [۳۱] به کمک پاندول انگلیسی انجام گردیده است. طول نمونه باید به اندازه‌ای باشد که پاندول بتواند ۱۵/۳ سانتی‌متر از سطح نمونه را جاروب کند. کالیبره کردن دستگاه از ضروریات این آزمایش بوده که در دو مرحله انجام شده است. در حالتی که نمونه حضور ندارد، عقربه پس از رها شدن باید عدد صفر قرار گیرد و همچنین در صورت حضور مصالح استاندارد که دارای میزان اصطکاک مشخصی است، میزان اصطکاک تعیین شده توسط دستگاه باید صحیح باشد. شکل ۲ دستگاه پاندول انگلیسی نشان داده شده است. توجه شود که با توجه به آن که طول یکی از کفشک‌های موجود برای آزمایش حدود ۴ سانتی‌متر است، از نمونه‌های منشوری به ابعاد ۲۸۵×۷۵×۷۵ میلی‌متر مکعب در این آزمایش استفاده شده است. تعداد نمونه‌های هر طرح ۹ نمونه و تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای تعیین اصطکاک سطحی ۳۶ نمونه است.

۲-۳-۵- جمع شدگی آزاد

بررسی جمع شدگی آزاد بتن بر اساس استاندارد ASTM C157 [۳۲] انجام شده است. اگر اندازه بزرگ‌ترین دانه کمتر از ۲۵ میلی‌متر باشد، می‌توان از نمونه‌های منشوری با ابعاد ۲۸۵×۷۵×۷۵ میلی‌متر مکعب استفاده کرد. بتن مورد نیاز نمونه‌ها در دو لایه تقریباً مساوی درون قالب ریخته



شکل ۳. قالب‌های ساخته شده برای آزمایش جمع شدگی مقید پیش از قالب‌گیری بتن (سمت راست) و در هنگام داده برداری (سمت چپ)

Fig. 3. Specimen mold before test (Right) and molded concrete specimen under Data Acquisition (Left)

گردیده است. تعداد نمونه‌های مورد نیاز جهت تعیین جمع شدگی آزاد هر طرح ۳ نمونه و تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۶ نمونه است (لازم به ذکر است آزمایش جمع شدگی مقید تنها برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ انجام پذیرفته است). سایر جزئیات مربوط به انجام آزمایش در استاندارد ذکر شده آورده شده است. قابل ذکر است قالب‌های مربوط به آزمایش جمع شدگی مقید در این پژوهش مطابق با استاندارد ساخته شد و عملاً به بخشی از فرآیند پژوهش تبدیل گردید.

کننده مصرفی در طرح شاهد و ییافی، مشاهده شد که با افزودن الیاف جرم حجمی کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند به دلیل تراکم سخت‌تر بتن ییافی نسبت به بتن عادی باشد که موجب افزایش تخلخل بتن می‌گردد. همچنین جرم حجمی پایین الیاف استفاده شده در بتن از دیگر دلایل این کاهش باشد [۳۴]. در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ استفاده از الیاف تاثیر چندانی بر جرم حجمی نگذاشته است. علت این امر آن است که هنگام استفاده از الیاف در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، اسلامپ ابتدا به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و کمتر از مقدار قابل قبول در این آزمایش گردید. این امر باعث شد مقدار فوق روان کننده مصرفی در این طرح در هر متر مکعب بتن، ۱ کیلوگرم بیشتر از بتن شاهد گردد و مقدار افت اسلامپ نسبت به بتن شاهد جبران و حتی اندکی بهبود یابد. بنابراین در این نسبت آب به سیمان، تاثیر الیاف بر تراکم و تخلخل بتن به کمک استفاده از فوق روان کننده بیشتر جبران گردید فلذا جرم حجمی نیز تغییر آنچنانی نکرده است.

استفاده از الیاف موجب کاهش میزان اسلامپ شده است، که در نمونه‌های الیافی مشهود است. هر چند در بتن ییافی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در ظاهر کاهش اسلامپ دیده نمی‌شود، اما استفاده از فوق روان کننده بیشتر نسبت به بتن شاهد برای جبران افت قابل توجه اسلامپ، نشان دهنده تاثیر الیاف در کاهش اسلامپ و روانی بتن در این نسبت می‌باشد. علت این امر را می‌توان در قفل و بست شدن سنگدانه‌ها و الیاف درهم دانست که

مقادیر مربوط به اسلامپ و جرم حجمی بتن تازه

شده در جدول ۶ نمایش داده شده است. کاهش نسبت آب به سیمان در این پژوهش، افزایش مقدار جرم حجمی بتن را نتیجه می‌دهد. افزایش حجم سنگدانه با کاهش نسبت آب به سیمان، کاهش میزان آب مصرفی در عیار ثابت سیمان و کاهش میزان آب آزاد بتن می‌تواند از علل وقوع این اتفاق باشد. همچنین کاهش میزان آب مصرفی به دلیل کاهش نسبت آب به سیمان موجب افت اسلامپ و کارایی بتن می‌گردد و نیاز به استفاده از فوق روان کننده بیشتر را موجب می‌شود که علت آن کاهش میزان آب آزاد در نتیجه مشارکت حجم عمده آب مصرفی در فرآیند هیدراسیون می‌باشد.

۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل و بررسی

۳-۱- اسلامپ و جرم حجمی بتن تازه

در نسبت آب به سیمان ۰/۴ با توجه به یکسان بودن مقدار فوق روان

جدول ۶. نتایج آزمایش اسلامپ و جرم حجمی بتن

6. Fresh Properties of Mix Compositions (Slump & Density)

ردیف	نام طرح	مقدار فوق روان کننده در یک متر مکعب بتن (kg)	اسلامپ (mm)	جرم حجمی (kg/m ³)
۱	OPC 0.35	۲	۶۳	۲۳۷۲
۲	FIBER 0.35	۳	۶۸	۲۳۷۵
۳	OPC 0.4	۱/۶	۶۰	۲۳۴۴
۴	FIBER 0.4	۱/۶	۵۲	۲۲۹۷

فشاری بتن در سنین مختلف شده است. علت این امر می‌تواند افزایش میزان هوای بتن و تخلخل آن باشد که به ناهمگنی بتن حاوی این ماده دامن می‌زند [۱۵]. همچنین با بررسی پژوهش‌های پیشین به نظر می‌رسد افزایش تخلخل در بتن با توجه به عدم تغییر مقدار و اندازه ژل CSH در حضور یا عدم حضور الیاف، موجب افزایش تخلخل ناحیه انتقالی و وجود حفرات بیشتر هوا در آن شده که ضعف در بتن را افزایش می‌دهد و در نتیجه مقاومت فشاری بتن الیافی کاهش می‌یابد [۱۰].

همچنین در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ با افزودن الیاف به بتن، افزایش مقاومت فشاری بتن ملاحظه گردید. در طرح با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ حاوی الیاف، از مقدار بیشتری فوق روان کننده نسبت به طرح شاهد استفاده شد و بنابراین بتن الیافی به میزان تراکم مطلوب رسید که نتیجه آن تخلخل پایین‌تر و ضعف کمتر در بتن و خصوصاً ناحیه انتقالی می‌باشد. از طرفی الیاف استفاده شده در بتن مانع شکل‌گیری ترک‌ها و خصوصاً گسترش آن‌ها می‌شود. این مواد مسلح کننده با برقراری پل در دو سمت ترک، از بازشدگی دهانه ترک و جدا شدن تکه‌های بتنی جلوگیری کرده که نتیجه کار، کنترل ریزترک‌ها و افزایش مقاومت بتن می‌باشد. به علاوه حضور الیاف موجب کاهش تمرکز تنش، تغییر جهت و تاخیر در رشد آن‌ها می‌گردد [۱۶]. در نهایت مقاومت فشاری بتن الیافی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در این پژوهش، تا حدود ۲۰ درصد افزایش پیدا کرد. حسنی و همکاران [۳۸] و حسین^۱ و همکاران [۳۹] نیز در پژوهش‌هایی که بر روی استفاده از بتن الیافی در روسازی‌های بتنی انجام دادند به نقش مثبت و موثر الیاف در

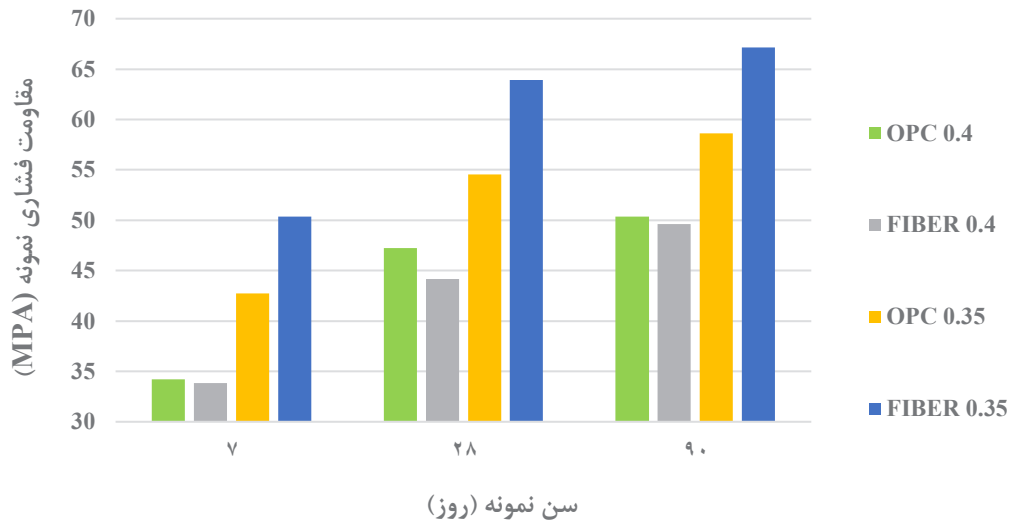
موجب می‌شود سنگدانه‌ها به راحتی نتوانند جابه‌جا شوند و کارایی کاهش یابد [۳۵ و ۱۴]. همچنین پیوند فیزیکی بین ناحیه انتقالی و الیاف (جذب ملات به سطح الیاف) می‌تواند دلیل دیگری بر این کاهش در میزان اسلامپ باشد [۱۱]. حسنی و همکاران [۳۸] در پژوهشی به بررسی تاثیر الیاف بر مشخصات مکانیکی و دوامی روکش‌های بتنی روسازی‌ها پرداختند و به نتایج مشابهی دست یافتند، آن‌ها ملاحظه کردند که استفاده از الیاف موجب افزایش میزان فوق روان کننده مصرفی به منظور رسیدن به اسلامپ خاص می‌باشد.

همچنین نشریه ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه اسلامپ روسازی‌های بتنی را در محدوده ۱۰ تا ۷۰ میلی‌متر مجاز دانسته است [۴۳] که به علت کاهش خطای ناشی از عدم تراکم مناسب و سایر مشکلات، در این پژوهش اسلامپ بتن مورد بررسی ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (دامنه ۵۰ الی ۷۰ میلی‌متر) و خروجی اسلامپ‌ها نیز در محدوده مجاز آیین نامه‌ای قرار گرفت.

۳-۲- مقاومت فشاری

نتایج مربوط به مقاومت فشاری طرح‌های شاهد و الیافی در هر دو نسبت آب به سیمان در شکل ۴ نمایش داده شده است.

شکل ۴ نشان می‌دهد، کاهش نسبت آب به سیمان در کنار ثابت بودن میزان سیمان مصرفی، مقاومت فشاری را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد، افزایش سهم سنگدانه‌ها در بتن و کاهش ناحیه انتقالی بتن در صورت کاهش نسبت آب به سیمان از جمله دلایل وقوع این پدیده می‌باشند. استفاده از الیاف در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴ موجب کاهش مقاومت



شکل ۴. مقایسه مقاومت فشاری طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 4. Results of Compressive Strength test

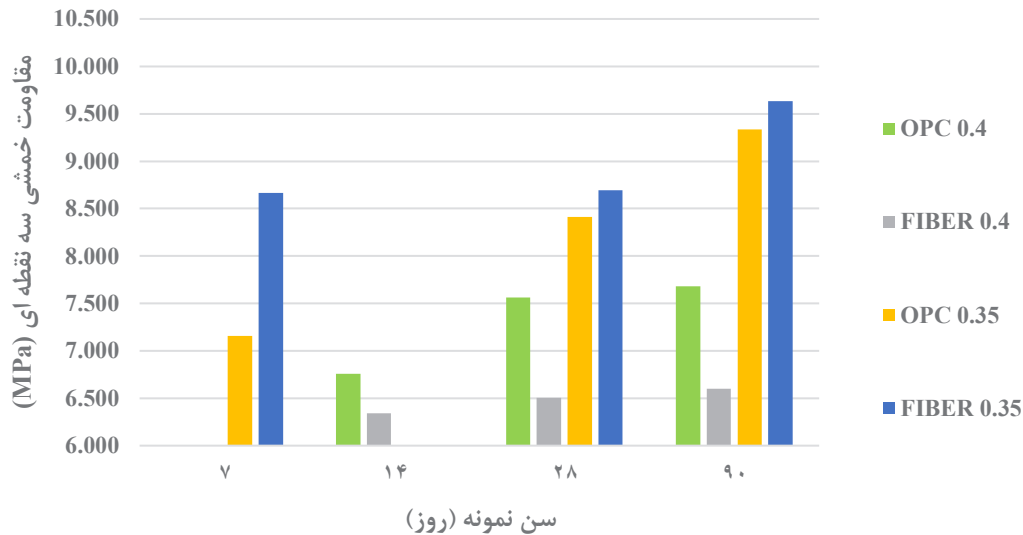
غالب انواع الیاف‌ها (از جمله پلی‌پروپیلن) در بتن با اعضای این ماده واکنشی نداشته و یک عضو خنثی از منظر واکنش‌های شیمیایی در بتن محسوب می‌شود [۱۰] و استفاده از این ماده غالباً به منظور جلوگیری از گسترش ترک‌ها است. مقاومت خمشی بتن الیافی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ نسبت به بتن شاهد خصوصاً در سنین بالاتر به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که علت آن می‌تواند افزایش تخلخل، تراکم سخت‌تر نسبت به بتن شاهد و ضعف در ناحیه انتقالی در اثر افزایش منافذ می‌باشد [۱۵ و ۱۰]. طرح‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ با توجه به افزایش مقدار فوق روان کننده مصرفی نسبت به بتن شاهد، استفاده از الیاف موجب بهبود مقاومت خمشی به دلیل توزیع مناسب تر الیاف و همگنی بتن الیافی در کنار کنترل ریز ترک‌ها توسط این مواد می‌گردد [۱۶].

توجه شود که در نسبت آب به سیمان ۰/۴، کارایی بتن الیافی کمتر از بتن شاهد می‌باشد، لذا برای آن که تراکم به نحو مناسبی صورت پذیرد و همچنین تخلخل بتن کاهش یابد نیاز به انرژی تراکم بیشتری می‌باشد [۲۱]. در این پژوهش میزان انرژی تراکم برای نمونه‌های ۰/۴ بتن الیافی افزایش نیافته به این علت که دلیل دیدگاه‌های متفاوت موجود در ادبیات موضوع به واسطه افزودن الیاف به بتن نمایان گردد. بنابراین ملاحظه می‌گردد، در صورتی که در بتن الیافی بتوان همگنی و کارایی را به نحو مناسبی ایجاد کرد، استفاده از الیاف سبب تقویت مقاومت خمشی می‌شود و در صورتی که این اقدام صورت نپذیرد، استفاده از الیاف اثر سوء بر این مقاومت می‌گذارد.

افزایش مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در روسازی‌های بتنی اشاره کردند. بنابراین ملاحظه می‌گردد، در صورتی که در بتن الیافی بتوان همگنی را به نحو مناسبی ایجاد کرد، استفاده از الیاف سبب تقویت مقاومت فشاری می‌شود و در صورتی که این اقدام صورت نپذیرد و همگنی بتن الیافی تحت الشعاع قرار گیرد، استفاده از الیاف اثر سوء بر مقاومت فشاری خواهد داشت. همچنین نشریه ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه حداقل مقاومت فشاری مجاز روسازی‌های بتنی را ۳۰ مگاپاسکال اعلام کرده است [۴۳]. همان گونه که ملاحظه می‌شود کلیه خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری بیشتر از مقدار حداقل بوده و قابل قبول می‌باشد.

۳-۳- مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

نتایج آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر روی طرح‌های مورد بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. در نسبت آب به سیمان ۰/۴ به علت آسیب دیدگی دستگاه در سن ۷ روز و امکان پذیر نبودن انجام آزمایشات در سن مشخص شده، به ناچار مقاومت خمشی نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ در سن ۱۴ روزه به جای سن ۷ روز اندازه‌گیری شده است. نسبت آب به سیمان از پارامترهای موثر در مقاومت خمشی بوده به این صورت که کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت خمشی را به میزان قابل قبولی افزایش داده است. کاهش آب آزاد موجود در بتن و کاهش تخلخل را می‌توان از علل وقوع این پدیده در هنگام کاهش نسبت آب به سیمان دانست.



شکل ۵. مقایسه مقاومت خمشی طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 5. Results of Center-Point Flexural Strength test

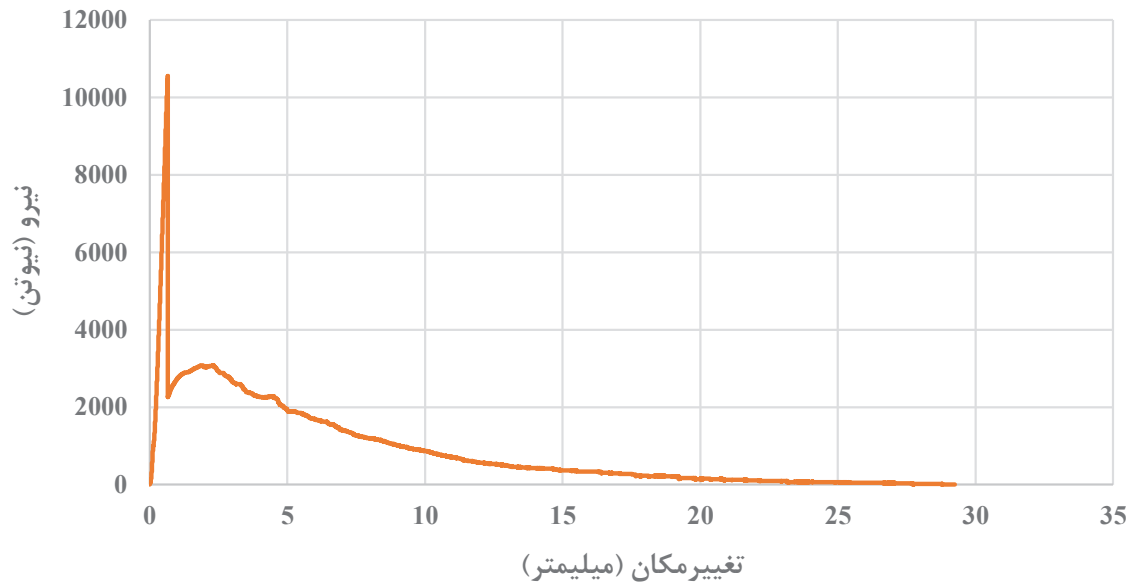
کاهش ۱۵ درصدی ضخامت روسازی بودند. به علاوه حسین^۲ و همکاران [۳۹] تاثیر مقاومت خمشی را بر یک حالت بارگذاری خاص بررسی نمودند و رابطه‌ای بین مقاومت خمشی و ضخامت روسازی برای مطالعه موردی خود به دست آوردند. آن‌ها مشاهده کردند استفاده از ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن سبب کاهش حدود ۲۰ درصدی ضخامت روسازی می‌گردد.

به منظور تعیین عملکرد الیاف در جذب انرژی پس از شکستن بتن، بارگذاری پس از ترک خوردن بتن ادامه یافت. انرژی جذب شده برابر است با سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان که برای کلیه نمونه‌های الیافی تعیین شده است. نمونه‌ای از نمودارهای نیرو-تغییر مکان بتن الیافی در شکل ۶ قابل ملاحظه می‌باشد. در صورتی که بتن از نوع معمولی باشد نمودار فقط شامل بخش اول (ناحیه ترد با شکست زیاد) می‌باشد و در صورتی که بتن الیافی داشته باشیم بعد از شکستن نمونه الیاف وارد عمل شده و انرژی را مستهلک می‌کنند.

شاخص‌های مرتبط با جذب انرژی در نمونه‌های الیافی در سنین مختلف با استفاده از روابط موجود در بخش ۲-۳-۲ تعیین گردید. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به صورت موثر و قابل توجهی سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان کاهش می‌یابد و موجب افزایش انرژی مستهلک شده با استفاده از این الیاف می‌شود. علت این

در پژوهش‌های دیگری که در رابطه با روسازی‌های بتنی صورت پذیرفته نیز به نقش مثبت الیاف در بهبود مقاومت خمشی اذعان شده است [۳۸ و ۳۹]. همچنین چن^۱ و همکاران [۴۰] مطالعه‌ای را در خصوص تاثیر الیاف‌های مصنوعی بر مشخصات مکانیکی و دوامی روسازی بتنی فرودگاه‌ها انجام دادند، آن‌ها مشاهده کردند برای درصدهای حجمی الیاف کمتر از ۰/۱۲ درصد، نقش الیاف در بهبود مقاومت خمشی قابل قبول می‌باشد. به علاوه نشریه ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه حداقل مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مجاز برای روسازی‌های بتنی را ۴/۵ مگاپاسکال اعلام کرده است [۴۳]. همان گونه که ملاحظه می‌شود کلیه خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری بیشتر از مقدار حداقل بوده و از منظر آیین نامه‌ای کلیه طرح‌های بتنی قابل قبول می‌باشند.

همچنین بهبود مقاومت خمشی بتن به طور مستقیم بر ضخامت روسازی بتنی تاثیر دارد و موجب کاهش ضخامت روسازی بتنی می‌گردد. مقدار ضخامت روسازی، علاوه بر مقاومت خمشی به عوامل دیگری چون مدول عکس العمل بستر، ترافیک و... نیز وابسته است و بنابراین نمی‌توان یک عدد یا یک درصد خاص را برای کاهش ضخامت ارائه داد و نیازمند انجام مطالعه موردی است به طور مثال پژوهشگران با افزایش ۱۰ درصدی مقاومت خمشی هنگام طراحی روسازی یک فرودگاه با بارگذاری و شرایط مشخص، شاهد



شکل ۶. نمونه‌ای از نمودار نیرو-تغییر مکان بتن الیافی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ در سن ۹۰ روز

Fig.6. Force-Displacement diagram of one of fiber reinforced concrete samples with a W/C ratio of 0.4 and age of 90 days

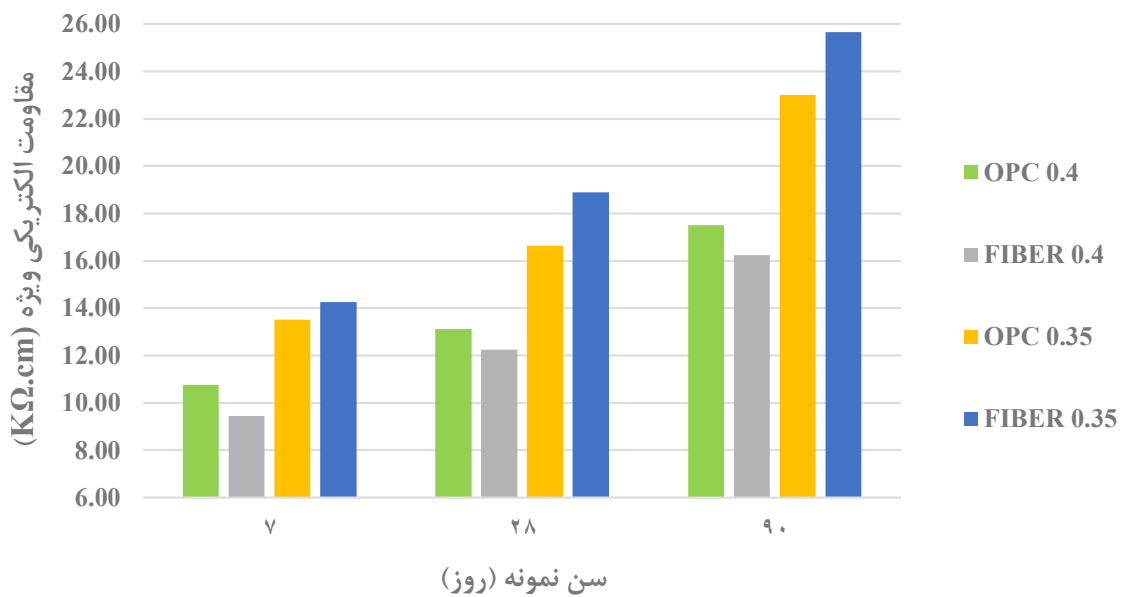
جدول ۷. نتایج حاصل از تعیین شاخص سختی در بتن‌های الیافی

Table 7. Results of Toughness index & Residual strength factor of fiber reinforced concrete

شاخص سختی و میزان جذب انرژی						سن طرح	نام طرح
شاخص $R_{20,10}$	شاخص $R_{10,5}$	شاخص I_{20}	شاخص I_{10}	شاخص I_5			
۴/۷۵	۷/۰۲	۲/۹۲۳	۲/۴۴۸	۲/۰۹۷	۱۴ روزه	FIBER 0.4	
۴/۶۲	۵/۹۸	۲/۷۸۶	۲/۳۲۴	۲/۰۲۵	۲۸ روزه		
۱/۹۸	۲/۳۲	۲/۲۰۴	۲/۰۰۶	۱/۸۹۰	۹۰ روزه		
۳/۴۹	۴/۴	۲/۷۲۳	۲/۳۷۴	۲/۱۵۴	۷ روزه	FIBER 0.35	
۳/۱۱	۴/۸۶	۲/۶۴۴	۲/۳۳۳	۲/۰۹۰	۲۸ روزه		
۲/۰۳	۲/۵۲	۲/۴۱۷	۲/۲۱۴	۲/۰۸۸	۹۰ روزه		

همچنین با افزایش سن بتن، معمولاً شاخص‌های چقرمگی کاهش می‌یابند که علت آن را می‌توان افزایش مقاومت خمشی بتن و سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان آن دانست.

امر برقراری پل در دو سمت ترک است که مانع از گسیختگی ترد خمشی بتن می‌شود. الیاف به گونه‌ای عمل می‌کنند که پس از گسیختگی بتن، انرژی حاصل از بار خمشی توسط الیاف‌ها مستهلک می‌شود، این امر از طریق مدیریت نیرو و ذخیره آن در مقطع بتنی توسط الیاف صورت می‌گیرد.



شکل ۷. مقایسه مقاومت الکتریکی طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 7. Results of Electrical Resistance test.

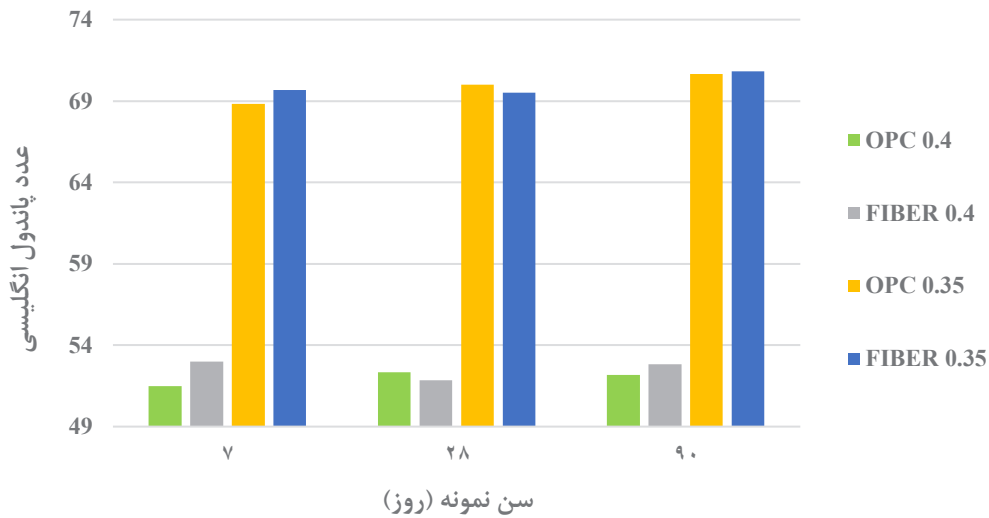
۳-۴- مقاومت الکتریکی

در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، کاهش کارایی بتن الیافی با استفاده از فوق روان کننده جبران شده و روانی اندکی از نمونه شاهد نیز فراتر رفته است. در این حالت با توجه به عدم افزایش قابل توجه تخلخل و درصد هوای موجود بتن و نقش الیاف در کاهش رسانایی بتن، استفاده از الیاف موجب بهبود در مقاومت الکتریکی بتن شده و عملکرد مطلوب‌تری نسبت به بتن شاهد را از خود نمایش می‌دهد [۱۷]. در مطالعه‌ای که توسط چن^۱ و همکاران [۴۰] بر روی روسازی بتنی فرودگاه‌ها انجام شد نیز به نقش موثر الیاف مصنوعی در کاهش نفوذپذیری یون کلراید به صراحت اشاره شده است.

توجه شود که مقاومت الکتریکی به خودی خود در روسازی‌های بتنی از اهمیت کمتری نسبت به آزمایش‌های مکانیکی برخوردار است. اما از آنجایی که یکی از شاخص‌های نشان دهنده مباحث دوامی بتن می‌باشد، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. همچنین مقاومت الکتریکی با استاندارد بررسی شده، امکان برآورد از میزان نفوذ یون کلراید که از منظر دوامی حائز اهمیت است را فراهم می‌سازد. به همین دلیل این آزمایش در این مطالعات مورد توجه قرار گرفت.

شکل ۷ نشان دهنده مقاومت الکتریکی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های اشباع در این پژوهش است. افزایش نسبت آب به سیمان به علت افزایش حجم آب آزاد بتن و به تبع آن تخلخل بتن، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که مقاومت الکتریکی در این پژوهش به منظور وجود نماینده‌ای از آزمایش‌های دوام در نظر گرفته شده است و به خودی خود اهمیت ویژه‌ای در روسازی‌ها ندارد.

در نسبت آب به سیمان ۰/۴، افزودن الیاف موجب کاهش جزئی در مقاومت الکتریکی شده است. الیاف پلی‌پروپیلن رسانای جریان الکتریسیته نیستند و بنابراین رسانایی منافذ داخلی لوله‌های مویین را کاهش می‌دهند [۱۰]. لذا انتظار می‌رود، افزودن این ماده موجب بهبود مقاومت الکتریکی شود. با این حال باید توجه شود که استفاده از الیاف موجب کاهش کارایی بتن گردیده که این عامل موجب افزایش تخلخل بتن می‌گردد [۱۵ و ۱۰]. بنابراین افزودن الیاف، تخلخل و میزان هوای موجود در بتن را افزایش داده و موجب کاهش مقاومت الکتریکی آن از این منظر می‌شود. در نهایت تاثیر افزایش تخلخل بتن بیشتر از کاهش رسانایی منافذ داخلی بوده و لذا افزودن الیاف موجب کاهش جزئی مقاومت الکتریکی بتن شده است [۱۶].



شکل ۸. مقایسه آزمایش پاندول انگلیسی طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 8. Results of Skid Resistance test

که یکی از عوامل مورد نیاز در محاسبه سرعت طرح راه می‌باشد. الحسن^۳ و همکاران نیز رابطه‌ای بین ضریب اصطکاک جنبشی و عدد پاندول انگلیسی ارائه کردند که به صورت $COD = \left(\frac{110}{PN} - \frac{1}{3} \right)^{-1}$ می‌باشد که در آن، COD ضریب اصطکاک جنبشی و PN عدد پاندول است به کمک این روش نیز ضریب اصطکاک جنبشی برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵ به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۵۴ به دست می‌آید که حاکی از عملکرد مثبت کاهش نسبت آب به سیمان بر اصطکاک روسازی می‌باشد.

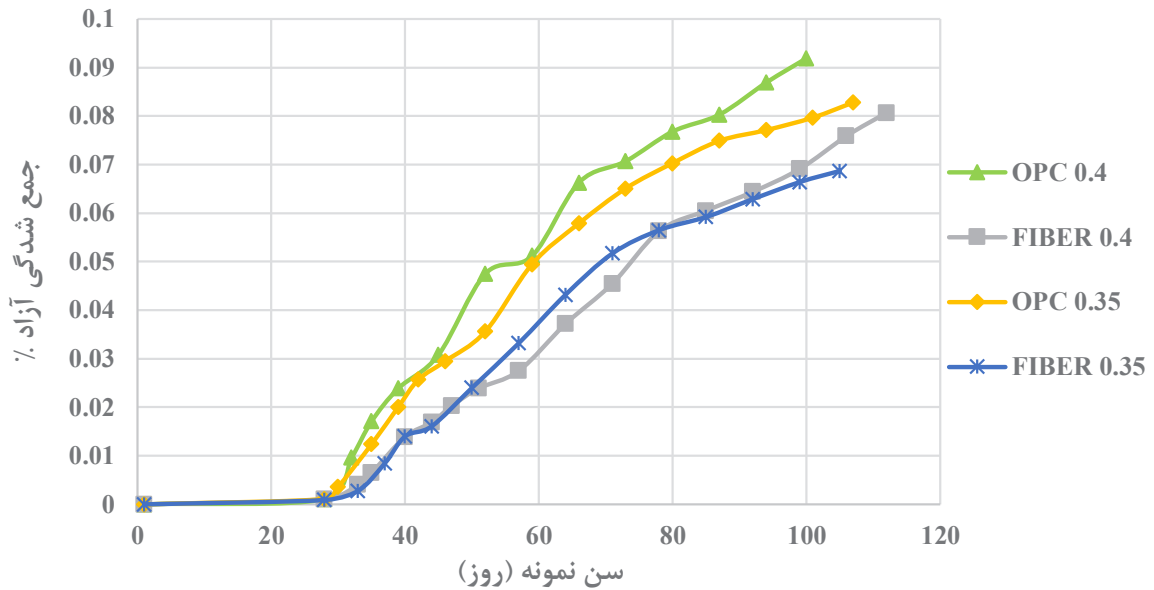
۳-۶- جمع شدگی آزاد

نتایج مربوط به تغییر طول آزاد بتن در شکل ۹ قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به سیمان غالباً موجب کاهش جمع شدگی آزاد به دلیل کاهش خمیر سیمان و تخلخل شده است. همچنین استفاده از الیاف موجب بهبود وضعیت بتن از منظر جمع شدگی آزاد شده است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که الیاف از سویی در بین ذرات سنگدانه‌ها قفل می‌شود و از سوی دیگر ذرات خمیر سیمان را به سطح خود جذب می‌نماید و به این طریق مانع از جابه‌جایی آزاد ذرات درون بتن و وقوع جمع شدگی می‌گردد [۱۴ و ۱۱]. میزان کاهش این پدیده در بتن در سنین مختلف، متفاوت بوده و در محدوده تقریبی ۵۰-۱۵ درصد متغیر است.

۳-۵- اصطکاک سطحی

آزمایش پاندول انگلیسی بر روی سطح اجرا شده انجام می‌گردد و تا حد زیادی به کیفیت اجرا، مقدار و جنس سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان و حجم خمیر سیمان وابسته است. نتیجه انجام این آزمایش در قالب مقدار آزمایش پاندول (PTV) گزارش می‌شود و هرچه این عدد بزرگتر باشد حاکی از اصطکاک سطحی بیشتر روسازی است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، کاهش نسبت آب به سیمان سبب کاهش حجم خمیر بتن و افزایش زبری آن شده و موجب افزایش عدد آزمایش پاندول و در نتیجه افزایش اصطکاک سطحی می‌گردد. همچنین تاثیر الیاف بر مقاومت اصطکاکی چندان واضح نیست و رفتار طرح‌های بتنی در سنین مختلف، متفاوت است. همچنین لو^۱ و استیون^۲ [۳۶] به بررسی ادبیات موضوع آزمایش‌های اصطکاک پرداختند، آن‌ها رابطه بین عدد پاندول انگلیسی و اصطکاک دینامیکی برای سایت‌های ناسا را به صورت $DF = 0.0173 \times PN - 0.399$ اعلام داشتند که PN عدد پاندول انگلیسی و DF اصطکاک دینامیکی می‌باشد. بنابراین اصطکاک دینامیکی حدودی نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ (فارغ از الیافی یا شاهد بودن آن) به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۵ می‌باشد

1 Lo
2 Steven



شکل ۹. مقایسه جمع شدگی آزاد طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig.9. Results of Free Shrinkage test (Length change test)

متناظر با طرح شاهد و بتن الیافی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. افت ناگهانی کرنش در سن حدود ۲۰ روزه در نمونه‌های شاهد، نشان دهنده ترک خوردگی بتن شاهد در این سن می‌باشد. همچنین سن ترک خوردگی طرح الیافی بررسی شده در این پژوهش حدود ۱۸ روز می‌باشد که نسبت به بتن شاهد، زودتر به وقوع می‌پیوندد که می‌تواند به دلیل همگنی بیشتر بتن شاهد نسبت به بتن الیافی، تخلخل و ... باشد. همچنین مقدار جمع شدگی حداکثر بتن الیافی در این سنین حدود MS65 می‌باشد و از حداکثر حدود ۷۵ بتن شاهد کمتر است که نشان دهنده بهبود عملکرد بتن از منظر جمع شدگی مقید می‌باشد. به علاوه بر اساس شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که پس از ترک خوردگی بتن الیافی، کرنش به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند، با این حال تفاوتی که با نمودار بتن شاهد دارد آن است که در بتن الیافی پس از ترک خوردگی بتن، همچنان نمودار دارای ماکزیموم‌های نسبی می‌باشد. به نظر می‌رسد علت این امر آن است که الیاف پس از ترک خوردن بتن فعال شده و با انتقال نیرو در طرفین ترک مانع از برداشته شدن کلیه تنش‌های ناشی از جمع شدگی در حلقه فلزی می‌گردند.

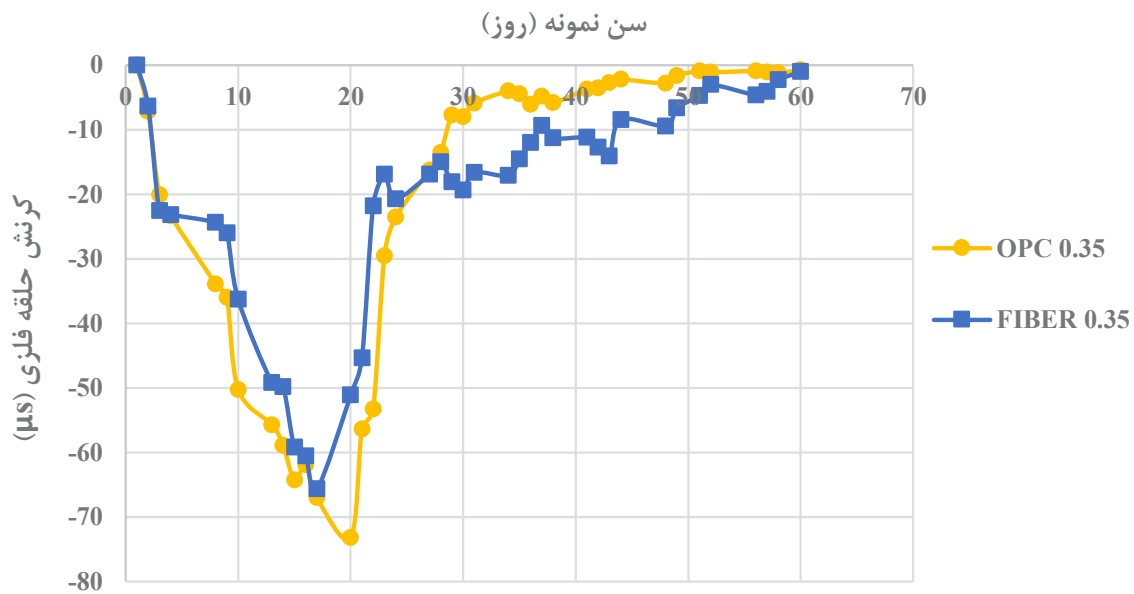
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از الیاف موجب کاهش جزئی مقدار حداکثر جمع شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود. با این حال این ماده

استفاده از الیاف در نسبت آب به سیمان ۰/۴، نه تنها تاثیر کاهش نسبت آب به سیمان تا ۰/۳۵ را جبران نموده، بلکه عملکرد بهتری به نسبت بتن شاهد از خود نشان داده است. موارد فوق نشان می‌دهد که علاوه بر کاهش نسبت آب به سیمان (به دلیل کاهش حجم خمیر و کاهش تخلخل) که موجب کاهش میزان جمع شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود، استفاده از الیاف تاثیر مطلوب تری نسبت به کاهش نسبت آب به سیمان بر روی جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن از خود نمایش می‌دهند.

چوی^۱ و همکاران [۴۱] پژوهشی را به منظور تعیین میزان کنترل جمع شدگی در روسازی‌های بتنی مسلح شده با الیاف در دستور کار قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با استفاده از الیاف، میزان کرنش‌های جمع شدگی ناشی از خشک شدن به میزان قابل توجهی کاهش یافت که حاکی از موثر بودن این مواد مسلح کننده در کنترل پدیده جمع شدگی می‌باشد.

۳-۷- جمع شدگی مقید

آزمایش جمع شدگی مقید به دلیل کمبود قالب‌های مخصوص، فقط بر روی نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ انجام گردید. کرنش حلقه فلزی



شکل ۱۰. کرنش حلقه فلزی بتن‌های شاهد و الیافی در آزمایش جمع شدگی مقید

Fig. 10. Results of Restrained Shrinkage test (strain induced in steel ring).

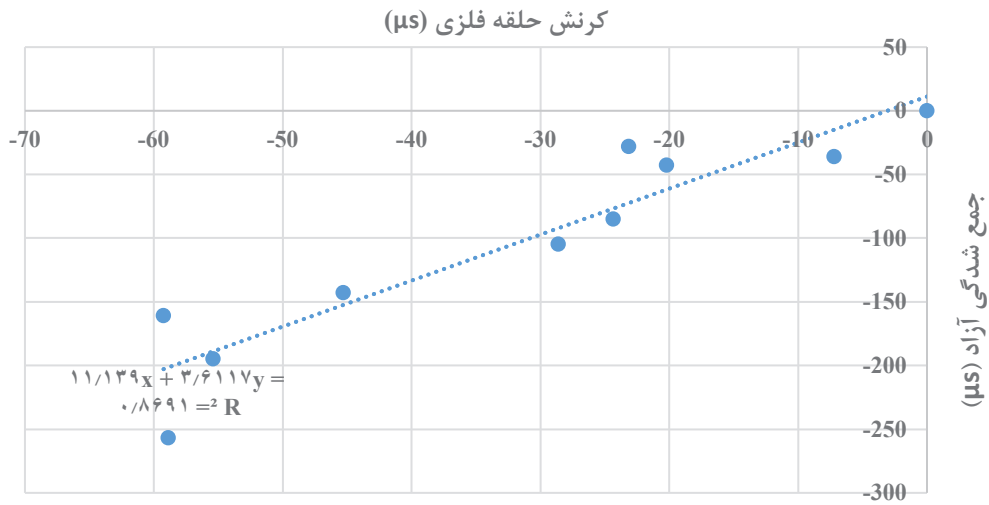
کاهش ۳۵ درصدی عرض ترک را در حضور الیاف نشان می‌دهد که بیشتر به دلایل آن اشاره گردید. برای این منظور در سنین مختلف عکس‌هایی از محل ترک گرفته شده است و با انتقال آن‌ها به نرم افزار اتوکد و مقیاس کردن تصاویر در آن، عرض ترک‌ها به کمک دستور اندازه‌گذاری نرم افزار با دقت خوبی اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۱ نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده را نمایش می‌دهد.

لازم به ذکر است که استاندارد اشتو رابطه را برای تعیین فاصله بین درزها ارائه داده که به صورت،
$$\Delta L = \frac{C \times L \times (\alpha_c \times DT_D + Z) \times 100}{S}$$
 که در آن، L فاصله بین درزها، α_c ضریب انقباض حرارتی بتن، DT_D دامنه حرارتی فارنهایت، S کرنش مجاز مواد پر کننده، Z ضریب انقباض حرارتی، C ضریب اصلاح اصطکاک بین دال و زیر اساس و نهایتاً ΔL مقدار باز شدن درز به دلیل انقباض ناشی از خشک شدن و تغییرات دما در بتن می‌باشد [۴۴]. با توجه به آن که استفاده از الیاف موجب کاهش ۳۵ درصدی میزان بازشدگی ترک‌های ناشی از پدیده جمع شدگی گردید، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، میزان ابعاد دال بتنی می‌تواند تا ۳۵ درصد افزایش یابد. (درصد دقیق افزایش ابعاد دال پس از لحاظ شدن میزان بازشدگی ناشی از تغییرات دمای بتن و برای هر پروژه به صورت مجزا تعیین می‌شود).

نتوانست زمان ترک خوردگی بتن را به تاخیر بیندازد و به صورت نامحسوس سبب تسریع در ترک خوردگی بتن شده است که دلیل آن می‌تواند توسعه کانال‌های انتقال آب به سطح و تشدید تخریب سطح بتن باشد [۱۵]. علت عدم تاثیر آنچنانی الیاف بر این نوع جمع شدگی عدم برقراری پیوند شیمیایی و یا تغییر در ریزساختار بتن توسط این ماده است [۱۰]. اصولاً الیاف پس از وقوع اولین ترک خوردگی وارد عمل می‌شود و از طریق برقراری پل در دو سمت ترک، مانع از افزایش عرض آن می‌گردد [۱۳-۱۰].

همچنین پژوهشی در فلوریدای آمریکا بر تاثیر انواع مختلف الیاف بر جمع شدگی روسازی‌های بتنی صورت پذیرفت که خروجی نتایج بر اثر پذیر بودن، الیاف بر جمع شدگی بتن حکایت داشت. در این گزارش اظهار شد که استفاده از الیاف با درصدهای حجمی پایین (کمتر از ۰/۵ درصد)، موجب کاهش قابل توجه جمع شدگی بتن می‌گردد و الیاف پلی‌پروپیلن موثرترین نوع الیاف در کاهش میزان جمع شدگی در میان انواع الیاف‌های مصرفی می‌باشد [۴۲].

همچنین گسترش عرض ترک‌ها در دو طرح در سن ۶۰ روز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که الیاف در کاهش عرض ترک به صورت موثری عمل می‌کند، به طوری که عرض ترک در سن شصت روز در نمونه شاهد و الیافی به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۵۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده که حاکی از



شکل ۱۲. رابطه بین جمع شدگی‌های مقید و آزاد

Fig.12. Relationship between Free & Restrained Shrinkage

که در آن N تعداد مشاهدات و P تعداد متغیرها می‌باشد. با توجه به آن R^2 و R^2 -Adjusted بیشتر از $0/8$ می‌باشد می‌توان پیش‌بینی‌های حاصل از این نمودار را قابل قبول خواند که علت آن، هم جنس بودن آن‌ها و عملکرد مشابه بتن در هر دو آزمایش می‌باشد. با این حال به منظور تعیین رابطه جامع و فارق از نوع ماده افزودنی، باید آزمایش‌های مربوطه بر روی انواع بتن‌ها صورت گیرد که می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر الیاف بر بتن‌های رایج در روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از این مسلح کننده تغییراتی را در خصوصیات بتن تازه و سخت ایجاد کرد و نتایج زیر را رقم زد:

- استفاده از الیاف موجب کاهش کارایی بتن شده که علت آن را می‌توان به ایجاد ممانعت توسط این مواد برای حرکت آزادانه سنگدانه‌ها و خمیر سیمان نسبت داد. این امر باعث شده در نسبت آب به سیمان $0/35$ مقدار بیشتری فوق روان کننده مورد نیاز باشد.

- مقاومت فشاری و خمشی بتن الیافی در نسبت آب به سیمان $0/4$ به دلیل کارایی پایین و افزایش تخلخل، حدود 10 درصد نسبت به بتن شاهد

به علاوه در این پژوهش تعدادی داده جمع شدگی مقید و آزاد در سنین مشابه اندازه‌گیری شد تا از این طریق رابطه بین این دو نوع جمع شدگی تعیین گردد. علت این امر آن است که معمولاً انجام آزمایش جمع شدگی مقید نیازمند تجهیزاتی از قبیل کرنش سنج، دیتا لاگر و... می‌باشد که استفاده از این تجهیزات کمی مشکل ساز است و در همه آزمایشگاه‌ها در دسترس نمی‌باشند. لذا پیدا کردن ارتباطی میان جمع شدگی مقید و آزاد این امکان را فراهم می‌کند تا با انجام آزمایش جمع شدگی آزاد، حدود و تقریبی از میزان جمع شدگی مقید به دست آید. لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده متعلق به هر دو طرح شاهد و الیافی می‌باشد، بنابراین از این نمودار می‌توان به منظور پیش‌بینی مقدار جمع شدگی مقید با داشتن مقادیر جمع شدگی آزاد، مستقل از الیافی و شاهد بودن طرح بهره برد. توجه شود که داده‌های مورد استفاده مربوط به سنین پیش از سن ترک خوردگی می‌باشد و میزان کرنش حلقه فلزی پس از ترک خوردن بتن به کمک این نمودار قابل تخمین نمی‌باشد.

شاخص خوبی برازش اصلاح شده از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$R^2\text{-Adjusted} = 1 - ((1 - R^2) \times (N - 1)) / (N - P - 1) = 0.814 \quad (1)$$

منابع

- [1] Embacher R.A., Snyder M.B., "Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads case study comparisons", Transportation Research, Rec 1749, p.p. 28–37, 2001
- [2] UoS (University of Sheffield), "Thin wire reinforcement for concrete", Br Patent Application, No 0130852.7 and 0511012.7, Sheffield, UK, 2005
- [3] Mostofinejad D., "Reinforced Concrete Structure", Volume 1, Arkan-e danesh publication, 2016 (in Persian)
- [4] Committee of concrete chemical additives, Iran concrete Institute, "the application of chemical additives in concrete", Yazda publication, 2014 (in Persian)
- [5] Nam J.H., Kim S.M., Won M.C., "Measurement and analysis of early-age concrete strains & stresses: continuously reinforced concrete pavement under environmental loading", Transportation Research, Board No. 1947, p.p. 79–90, 2006
- [6] Huang Y.H., "Pavement Analysis and Design", 2th Edition, Pearson Prentice Hall, 2004
- [7] Ruiz M., Rasmussen R.O., Chang G.K., Dick J.C., Nelson P.K., "Computer-based guidelines for concrete pavements", volume II: design and construction guidelines and HIPERPAVE II user's manual. FHWA-HRT-04-122, Federal, Highway Administration, Austin, USA, 2005
- [8] Chilwesa M., Facconi L., Minelli F., Reggia A., Plizzari G., "Shrinkage induced edge curling and debonding in slab elements reinforced with bonded overlays: Influence of fibers and SRA", Cement and Concrete Composites, Vol. 102, p.p. 105-115, 2019
- [9] Jafarifar N., Pilakoutas K., Bennett T., "The effect of shrinkage cracks on the load bearing capacity of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete pavements", Materials and Structures, Vol. 49, No. 6, p.p. 2329-2347, 2015
- [10] Ramezani-pour A.A., Esmaeili M., Ghahari S.A., Najafi M.H., "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability and physical and
- کمتر است، در حالی که در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ به دلیل استفاده از مقدار فوق روان کننده بیشتر، همگنی بتن الیافی بیشتر شده و بنابراین مقاومت فشاری و خمشی بتن الیافی در این حالت، به ترتیب افزایش حدود ۲۰ و ۱۵ درصدی در مقایسه با بتن شاهد داشته است. حضور الیاف موجب افزایش سختی و میزان انرژی جذب شده در بتن می‌شود. میزان استهلاک انرژی توسط الیاف پلی‌پروپیلن اصلاح شده در برخی مواقع تا ۳ برابر افزایش یافته است.
- در نسبت آب به سیمان ۰/۴، استفاده از الیاف موجب کاهش جزئی مقاومت الکتریکی و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، استفاده از این ماده موجب بهبود حدود ۱۵ درصدی مقاومت الکتریکی را شده است. همچنین تاثیر استفاده از الیاف بر اصطکاک سطحی، متفاوت بوده و نمی‌توان به نتیجه واضحی از عملکرد این ماده بر این پارامتر رسید.
- الیاف امباس مورد استفاده به دلیل ایجاد ممانعت از جابه‌جایی خمیر و سنگدانه‌ها موجب کاهش حدود ۲۰ درصدی جمع شدگی آزاد در بتن شده است. به علاوه استفاده از این نوع الیاف جمع شدگی مقید را حدود ۱۰ درصد کاهش داده است. در مقابل حضور این ماده موجب تسریع (هر چند جزئی) در وقوع ترک خوردگی در بتن شده است. همچنین این ماده موجب کاهش عرض ترک و تغییر شکل‌های ناشی از پدیده جمع شدگی به میزان ۳۵ درصد شده که دلیل آن برقراری پل انتقال نیرو توسط این مواد می‌باشد.
- با توجه به نتایج فوق می‌توان به عملکرد نسبتاً مطلوب الیاف در پدیده جمع شدگی و خصوصاً کنترل تغییر شکل‌ها و عرض ترک‌های ناشی از آن اذعان کرد و یادآور شد در صورتی که از الیاف در بتن استفاده گردد و افت کارایی ناشی از آن را به نحوی جبران کرد، می‌توان از مزایای این ماده در جهت کنترل ریزترک‌ها و بهبود مشخصات مکانیکی بهره برد. در مقابل در صورتی که افت اسلامپ و کارایی بتن توسط الیاف در محدوده مجاز باقی نماند و از روش‌های مختلف (از جمله افزودن مقدار فوق روان کننده بیشتر) برای افزایش کارایی استفاده نشود، به دلیل تراکم دشوارتر و همگنی کمتر بتن الیافی در این حالت نسبت به بتن شاهد، ضعف در مشخصات مکانیکی بتن الیافی قابل مشاهده است.

۵- تشکر و قدردانی

از مدیریت و مجموعه شرکت نانونخ و گرانول سیرجان به علت استقبال از پژوهش صورت گرفته بر روی الیاف این شرکت و تقبل بخشی از هزینه‌های پژوهش کمال قدردانی را دارم.

- Materials, Vol. 197, p.p. 464-473, 2019
- [20] Hossain F.Z., Shahjalal M., Islam K., Tiznobaik M., Alam M.S., “Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber”, *Construction and Building Materials*, Vol. 225, p.p. 983-996, 2019
- [21] Mo J., Zeng L., Liu Y., Ma L., Liu C., Xiang S., Cheng G., “Mechanical properties and damping capacity of polypropylene fiber reinforced concrete modified by rubber powder”, *Construction and Building Materials*, Vol. 242, p.p. 118111-118121, 2020
- [22] Jamali A., “Studying the effect of curing regime on the restrained drying shrinkage of concrete containing Shrinkage-Reducing-Admixture (SRA) and Fibers”, M.Sc thesis at K.N. Toosi university of technology, 2018
- [23] Rahmani T., Kiani B., Bakhshi M., Shekarchizadeh M., “Application of Different Fibers to Reduce Plastic Shrinkage Cracking of Concrete”, 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, pp. 635-642, 2012
- [24] Badogiannis E.G., Christidis K.I., Tzanetatos G.E., “Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 196, p.p. 443-456, 2019
- [25] Shah H.R., Weiss J., “Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test”, *Materials and Structures*, Vol. 39, p.p. 887-899, 2006
- [26] Gong J., Zeng W., Zhang W., “Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 159, p.p. 155-163, 2018
- [27] Iranian National Standardization Organization, “Hardened Concrete- Part 3: Compressive Strength of Test Specimens- Test Method”, ISIRI number 1608-3, first Edition, 2015 (in Persian)
- [28] ASTM C293, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)”, 2016
- mechanical characteristic of concrete for application in sleepers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, p.p. 411-418, 2013
- [11] Hsie M., Tu C., Song P.S., “Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 494, p.p. 153-157, 2008
- [12] Bagherzadeh R., Sadeghi A.H., Latifi M., “Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete”, *Textile Research Journal*, Vol. 82, No. 1, p.p. 88-96, 2011
- [13] Caggiano A., Gambarelli S., Martinelli E., Nisticò N., Pepe M., “Experimental Characterization of the Post-cracking Response in Hybrid Steel/ Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 125, p.p. 1035-1043, 2016
- [14] Olaoye R.A., Oluremi J.R., Ajamu S.O., “The Use of Fibre Waste as Complement in Concrete for a Sustainable Environment”, *Innovative Systems Design and Engineering*, Vol. 4, No. 9, 2013
- [15] Erena Ö., Mararb K., “Effect of Steel Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Normal and High Strength Concretes”, *Materials Research*, Vol. 13, No. 2, p.p. 274-279, 2010
- [16] Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T., “Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 94, p.p. 73-82, 2015
- [17] Kakooei S., Akil H.M., Jamshidi M., Rouhi J., “The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 27, p.p. 73-77, 2012
- [18] Barrera G.M., Nunez F.U., Gencel O., Brostow W., “Mechanical properties of polypropylene-fiber reinforced concrete after gamma irradiation”, *Composites: Part A*, Vol. 42, p.p. 567-572, 2011
- [19] Wang D., Ju Y., Shen H., Xu L., “Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber”, *Construction and Building*

- research record, Vol. 2672, No. 40, pp. 440-451, 2018
- [38] Hasani M., Nejad F.M., Sobhani J., Chini M., “Mechanical and durability properties of fiber reinforced concrete overlay: experimental results and numerical simulation”, *Construction and Building Materials*, Vol. 268, p.p.121083-121095, 2020
- [39] Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S., “Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene)”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 13, p.e00429, 2020
- [40] Chen Y., Cen G., Cui Y., “Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 184, p.p. 34-44, 2018
- [41] Choi S.Y., Park J.S., Jung W.T., “A study on the shrinkage control of fiber reinforced concrete pavement”, *Procedia engineering*, Vol. 14, p.p. 2815-2822, 2011
- [42] Suksawang N., Mirmiran A., Yohannes D., “Use of fiber reinforced concrete for concrete pavement slab replacement”, (No. BDK80 TWO 977-27). Florida. Dept. of Transportation. Research Center, 2014
- [43] Road, Housing & Urban Development Research Center, “Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements”, Road, Housing & Urban Development Research Center, Code No. 731, 2017
- [44] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), “AASHTO guide for design of pavement structures”, AASHTO, 1993.
- [29] ASTM C1018, “Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)”, 1997
- [30] FM5-578, “Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability”, 2004
- [31] BS-EN 13036-4, “Road and airfield surface characteristics. Test methods. Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test”, 2011
- [32] ASTM C157, “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete”, 2014
- [33] ASTM C1581, “Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage”, 2016
- [34] Noushini A., Vessalas K., Arabian G., Samali B., “Drying Shrinkage Behavior of Fibre Reinforced Concrete Incorporating Polyvinyl Alcohol Fibres and Fly Ash”, *Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering*, Volume 2014, Article ID 836173, 10 pages
- [35] Behfarnia K., Behravan A., “Application of high-performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels”, *Materials and Design*, Vol. 55, p.p. 274-279, 2014
- [36] Lu Q., Steven B., “Friction testing of pavement preservation treatments: literature review”, 2006
- [37] Alhasan A., Smadi O., Bou-Saab G., Hernandez N., Cochran, E., “Pavement friction modeling using texture measurements and pendulum skid tester”, *Transportation*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Gholami F. Moghadas Nejad , A. A. Ramezaniapour, A. M. Ramezaniapour, *The Effect of Emboss Fiber (Modified Polypropylene Fiber) on the Behavior of Concrete used in Concrete Pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 695-714.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19071.7054

