



ارزیابی تاثیر الیاف ماکروسینتتیک بر ضخامت و شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی‌های بتنی در زردار با در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی

ابوالفضل حسینی^{۱*}، سید جواد وزیری کنگ علیائی^۲، محمد رضا حاجی زاده^۳

^۱ گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۲ گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^۳ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

کلمات کلیدی:

روسازی‌های بتنی در زردار،

الیاف ماکروسینتتیک،

ضخامت روسازی،

شاخص هزینه‌ی ساخت،

مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی

خلاصه: در نظر گرفتن اثر مقاومت پس از ترک خوردگی و هزینه‌ی ساخت روسازی در طراحی ضخامت روسازی‌های بتنی در زردار، منجر به طراحی موثرتر و اقتصادی‌تر روسازی می‌گردد. بدین جهت این تحقیق به ارزیابی اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک بر ضخامت و هزینه‌ی ساخت روسازی‌های بتنی در زردار، با در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی بتن می‌پردازد. اثر الیاف ماکرو از جنس پلی‌پروپیلن در مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر مترمکعب بر تغییرات ضخامت و شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی‌های بتنی در زردار، با در نظر گرفتن مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل هر طرح اختلاط در طراحی ضخامت روسازی، بررسی گردید. مشاهده شد که افزودن الیاف ماکرو، باعث کاهش ضخامت روسازی بتنی در زردار تا میزان ۲۵ درصد گردید. بیشترین نرخ کاهش ضخامت روسازی در مقدار مصرف الیاف ۰ تا ۱ کیلوگرم اتفاق افتاده، و با افزودن بیشتر الیاف، کاهش ضخامت چشمگیری رخ نداد. افزودن الیاف، باعث افزایش شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی تا میزان ۵۷ درصد شد. مصرف الیاف ماکروسینتتیک تا مقدار ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، باعث ایجاد کمترین نرخ رشد شاخص هزینه روسازی، نسبت به مقادیر مصرف دیگر گردید. نتیجه شد که با در نظر گرفتن شدت رشد شاخص هزینه روسازی، می‌توان مقدار مصرف بهینه‌ی الیاف ماکروسینتتیک را جهت کاهش اقتصادی ضخامت روسازی تعیین کرد که در این تحقیق، به مقدار ۱ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.

۱- مقدمه

پروازی، در کنار روسازی انعطاف پذیر، مطرح شده و مورد توجه بیشتر متولیان و مجریان صنعت راه‌سازی کشور گردد [۲]. روسازی‌های بتنی در زردار غیر مسلح (JPCP)^۱ یکی از انواع متداول روسازی‌های بتنی مورد استفاده در ساخت جاده‌ها و سطوح پروازی است [۳]. عدم استفاده از میلگردهای مسلح کننده، یکی از مزایای مهم این روسازی، نسبت به دیگر روسازی‌های بتنی متداول، مانند روسازی‌های بتنی مسلح در زردار (JRCP)^۲ و مسلح پیوسته (CRCP)^۳، بوده که این موضوع باعث کاهش هزینه‌های اجرایی، زمان ساخت و اقتصادی تر شدن روسازی می‌گردد. در این روسازی‌ها با ایجاد درزهای انقباضی

روسازی‌های ساخته شده از بتن سیمانی، با دوام تر از روسازی‌های آسفالتی بوده و نیاز کمتری به عملیات تعمیر و نگهداری دارد. مدول الاستیسیته و برشی روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های انعطاف پذیر بیشتر بوده که باعث تغییر شکل‌های قائم و برشی کمتر این روسازی‌ها تحت اثر بارهای وارده می‌گردد [۱]. در سال‌های اخیر، افزایش قیمت قیر که باعث افزایش قیمت تمام‌شده‌ی روسازی آسفالتی می‌شود، از یک طرف، و تولید مازاد سیمان در کشور و نیاز بیشتر روسازی‌های آسفالتی به تعمیر و نگهداری، از طرف دیگر، باعث شده تا گزینه‌ی استفاده از روسازی‌های بتنی جهت ساخت جاده‌ها و سطوح

1 Jointed Plain Concrete Pavement
2 Jointed Reinforced Concrete Pavement
3 Continuously Reinforced Concrete Pavement

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hassani@modares.ac.ir



مستقیم با خصوصیات مقاومتی آن داشته [۱۱]، بنابراین افزایش مدول گسیختگی روسازی، منجر به کاهش ضخامت روسازی‌های بتنی درزدار غیر مسلح می‌گردد.

روسازی درزدار الیافی با افزودن الیاف مختلف به روسازی بتنی درزدار ساده، ساخته می‌شود [۲]. در سال‌های اخیر، محققان بسیاری به بررسی اثر افزودن الیاف مختلف بر خصوصیات مکانیکی روسازی‌های بتنی الیافی پرداختند [۱۲-۱۸]. افزودن الیاف می‌تواند باعث افزایش چشمگیر سختی ماتریس سیمان، مقاومت کششی، دوام و مقاومت در برابر ضربه شود [۱۹]. الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن به دلیل قیمت پایین و طیف وسیع خصوصیات الیاف، شامل مقاومت و مدول الیاف، از الیاف پر کاربرد در روسازی‌های بتنی می‌باشد [۲۰]. این الیاف از نظر شکل ظاهری و خصوصیات مکانیکی در دو گروه شامل الیاف میکرو و الیاف ماکرو جای می‌گیرد [۲۱]. الیاف میکرو اغلب جهت کنترل ترک خوردگی‌های زود هنگام در روسازی‌های بتنی استفاده می‌شود [۲۱]. الیاف ماکرو سازه‌ای، در مقادیر بالاتر نسبت به الیاف میکرو و به جهت افزایش خصوصیات مکانیکی، طاقت خمشی و جذب انرژی در روسازی‌های بتنی استفاده می‌گردد. افزودن الیاف ماکرو سازه‌ای در روسازی‌های بتنی، می‌تواند عملکرد خمشی بتن را بهبود بخشیده و مقاومت روسازی‌های بتنی در لحظه‌ی گسیختگی خمشی را افزایش دهد [۲۲، ۲۳] و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت خمشی بتن گردد. بنابراین افزودن این الیاف می‌تواند باعث کاهش ضخامت دال روسازی گردد. عملکرد اصلی الیاف ماکرو بر اساس پل زدگی^۲ در مخلوط‌های بتنی الیافی بوده که باعث کنترل گسترش ترک خوردگی شده، در نتیجه، مقاومت خمشی مخلوط بتنی پس از ترک خوردگی، افزایش می‌یابد [۲۴]. مقاومت پس از ترک خوردگی^۳ در روسازی‌های بتنی نیز به جهت افزایش مقاومت در برابر ترک‌های به وجود آمده در دراز مدت و افزایش دوام روسازی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در روش‌ها و روابط طراحی ضخامت روسازی‌های بتنی، تنها اثر مقاومت بتن در لحظه‌ی گسیختگی (مدول گسیختگی) لحاظ شده [۲] و در صورت مصرف این الیاف در مقادیر کمتر از ۰٫۱ درصد حجمی بتن، تاثیر آن بر مدول گسیختگی بتن، کم بوده که این موضوع باعث می‌شود تا ضخامت روسازی الیافی و روسازی‌های بدون الیاف، یکسان به دست آید [۲۵].

در فواصل مشخص، می‌توان ترک خوردگی‌های ناشی از تغییرات دما و رطوبت در روسازی را کنترل کرد. جهت انتقال بار در محل درزها از قفل و بست سنگدانه‌ای و میلگردهای دال استفاده می‌شود [۴]. از طرفی، امکان ایجاد درز با فواصل زیاد در این روسازی‌ها، به جهت کنترل بهتر ترک خوردگی‌ها نبوده و در دستورات عمل‌ها و آیین نامه‌های مرتبط، تاکید بر رعایت حداکثر فواصل درزهای انقباضی تعیین شده، می‌باشد [۵]. کاهش فواصل درزهای انقباضی منجر به افزایش هزینه‌های اجرایی شامل ایجاد درز و همچنین افزایش مصرف میلگردهای دال شده، که در نتیجه باعث افزایش هزینه‌ی کل ساخت روسازی می‌گردد.

یکی از راهکارهای موثری که می‌تواند باعث اقتصادی‌تر شدن ساخت این روسازی‌ها شود، کاهش ضخامت دال روسازی بتنی است. کاهش ضخامت دال روسازی با حفظ قابلیت باربری و دوام سازه، باعث کاهش مصرف مصالح مختلف مانند سیمان، مصالح سنگی، مواد افزودنی، و همچنین هزینه‌های عملیات اجرایی شده که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌ی کل ساخت روسازی می‌گردد. به دلیل کاهش مصرف مصالح به ویژه سیمان، و همچنین کاهش مصرف سوخت ماشین آلات اجرایی به دلیل کمتر شدن میزان بتن ریزی، کاهش ضخامت روسازی از نظر زیست محیطی نیز دارای مزایای زیادی است چرا که میزان دی اکسید کربن وارد شده به محیط اطراف کاهش می‌یابد [۶]. با توجه به مصرف کمتر بتن و مواد سیمانی، بروز پدیده‌هایی مانند جمع شدگی، با شدت کمتری صورت گرفته که این مورد جزو مواردی است که روسازی‌های بتنی به لحاظ ضخامت بالا رنج می‌یابد. بنابراین باعث کاهش خطر وقوع خرابی‌های به وجود آمده ناشی از این پدیده‌ها در روسازی می‌شود [۷، ۸]. ضخامت دال روسازی با مقاومت خمشی بتن روسازی، ارتباط عکس داشته، به طوری که با افزایش مدول گسیختگی بتن، ضخامت دال روسازی کاهش می‌یابد. در روش‌های طراحی ضخامت دال روسازی مانند روش آشتو، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته‌ی بتن، از عوامل تاثیر گذار در طراحی ضخامت دال روسازی می‌باشند [۹]. همچنین مریت و همکاران^۱ [۱۰]، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته‌ی بتن را دو عامل اصلی و تاثیر گذار بر طراحی ضخامت دال روسازی بتنی گزارش کرده‌اند. از آن جا که مدول الاستیسیته‌ی بتن، رابطه‌ی

2 Bridging
3 Post-cracking strength

1 Merrit et al.

پلیمری ماکرو، به دلیل عملکرد مناسب در مخلوط‌های بتنی و سادگی در ساخت این الیاف (با تغییر شکل مصالح پلی‌پروپیلن)، می‌تواند تاثیرات مناسبی بر عملکرد خمشی روسازی‌های بتنی درزدار غیر مسلح هنگام گسیختگی و پس از ترک‌خوردگی داشته باشد. از آن جا که، هزینه‌یکی از متغیرهای مهم در پروژه‌های ساخت روسازی بوده، تنها بررسی اثر افزودن این الیاف در کاهش ضخامت روسازی‌های بتنی درزدار کافی نبوده، و نیاز است تا اثر افزودن الیاف ماکرو پلیمری از نظر اقتصادی نیز بررسی گردد. این موضوع می‌تواند منجر به قضاوت و تصمیم‌گیری بهتر و مناسب‌تر جهت استفاده از این الیاف و انتخاب مقادیر مصرف بهینه با در نظر گرفتن اثر توأم تغییر ضخامت و هزینه در روسازی‌های بتنی گردد. دیده می‌شود که بررسی این موضوع، توجه کمتری را به خود جلب کرده است. بدین منظور، تحقیق حاضر به بررسی اثر الیاف ماکروسینتتیک در مقادیر مختلف بر ضخامت و هزینه روسازی‌های بتنی درزدار مسلح الیافی، با در نظر گرفتن مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی بتن، می‌پردازد.

۲- مصالح و روش

در این تحقیق، اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک به مخلوط‌های بتن روسازی در مقادیر مختلف، بر ضخامت و هزینه ساخت روسازی‌های بتنی درزدار، با در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی بررسی می‌شود. بدین منظور، پس از معرفی مصالح و تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با الزامات ذکر شده در ضابطه‌ی ۷۳۱ [۲]، الیاف ماکروسینتتیک در مقادیر مصرف ۰، ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب به طرح اختلاط بتن روسازی افزوده می‌شود. میزان اسلامپ و مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی تعیین شده و پس از بررسی رعایت الزامات اسلامپ و مقاومت فشاری بتن روسازی، مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل طرح‌های اختلاط مورد بررسی تعیین می‌گردد. با استفاده از نسبت مقاومت خمشی معادل طرح‌های اختلاط مورد بررسی، اثر مقاومت خمشی که بتن پس از ترک‌خوردگی، قادر به تحمل می‌باشد، در طراحی در نظر گرفته می‌شود. ضخامت روسازی‌های بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط حاوی مقادیر مختلف الیاف، برای استفاده در آزاد راه و بزرگ راه، با استفاده از روش انجمن سیمان پرتلند (PCA) و برنامه‌ی طراحی روسازی بتنی ارائه شده توسط

به منظور در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از گسیختگی بتن، در طراحی ضخامت دال روسازی، التوبات و همکاران^۱ [۲۵]، روش مقاومت خمشی موثر را، ارائه دادند. در این روش ظرفیت خمشی مقطع با استفاده از نسبت مقاومت خمشی معادل افزایش یافته و از مدول گسیختگی موثر به جای مدول گسیختگی بتن در روابط طراحی استفاده گردید. نتایج در مقیاس آزمایشگاهی و نتایج در مقیاس بزرگ تر، حاکی از اعتبار خوب این روش بود. لاهوسیک و همکاران^۲ [۲۶]، خصوصیات مکانیکی روسازی‌های بتنی غلتکی حاوی الیاف فلزی و ماکروسینتتیک را بررسی کردند. نتایج کار آنان نشان داد که افزودن الیاف، باعث افزایش مقاومت خمشی بتن نشده اما مقاومت بعد از ترک‌خوردگی آن را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. در انتها، بیان شد که با افزودن مناسب الیاف ماکروسینتتیک در بتن‌های غلتکی، می‌توان ضخامت این روسازی‌ها را کاهش داد. خان و همکاران^۳ [۲۷]، به بررسی استفاده از الیاف حاصل از موی انسان و الیاف موجی شکل پلی‌پروپیلن در راه‌های بتنی پرداخته و مشاهده کردند که با در نظر گرفتن اثر مقاومت پس از ترک‌خوردگی در بتن‌های الیافی، ضخامت دال روسازی تا میزان ۱۲/۵ میلی‌متر کاهش یافت. خان و همکاران در تحقیقی دیگر [۲۸]، خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی در مقادیر مختلف و الیاف نارگیل را ارزیابی کردند. خصوصیات مکانیکی بررسی شده شامل جذب انرژی و نشانه‌های سختی بود. آنان مشاهده کردند که ضخامت دال روسازی بتنی حاوی مقدار بهینه‌ی دوده‌ی سیلیسی به همراه الیاف نارگیل، تا مقدار ۱۲ میلی‌متر کاهش یافت. علی و همکاران^۴ [۲۹] به بررسی مزایای اقتصادی و زیست محیطی الیاف فلزی، شیشه و میکرو پلی‌پروپیلن در قطعات سیمانی الیافی مورد استفاده در روسازی‌های بتنی درزدار ساده پرداخته و نتیجه گرفتند که با استفاده از الیاف و مقدار مصرف مناسب در قطعات سیمانی الیافی، می‌توان روسازی‌های اقتصادی تر و سازگار تر با محیط زیست، احداث کرد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، دیده می‌شود که با افزودن الیاف و در نظر گرفتن مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی بتن، می‌توان ضخامت روسازی‌های بتنی را کاهش داد. از طرفی الیاف‌های

1 Altoubat et al.
2 LaHucik et al.
3 Khan et al.
4 Ali et al.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق
Table 1. Chemical specification of cement used in this study

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>	۵>	-	۶>	۶>	>۲۰	الزامات استاندارد ایران (۳۸۹)



شکل ۱. الیاف ماکروسینتتیک مورد استفاده در این تحقیق
Fig. 1. Macro synthetic fibers used in this study

با استاندارد ASTM C127 می‌باشد. سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ تهران با وزن مخصوص ۳۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. مشخصات شیمیایی این سیمان ارائه شده توسط آزمایشگاه کارخانه سیمان تهران به همراه الزامات استاندارد ایران شماره ۳۸۹، در جدول ۱ آورده شده‌است. الیاف مورد استفاده در این تحقیق که از توزیع کننده و وارد کننده‌ی آن^۱ تهیه شده، الیاف ماکرو پایه‌ی پلی‌اولفین/پلی‌پروپیلن به صورت رشته‌های در هم تابیده/شبکه ای تولید شرکت FORTA مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM C7508 می‌باشد. شکل ظاهری این الیاف در شکل ۱ دیده می‌شود. مشخصات فنی این نوع الیاف در دانشکده نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در جدول ۲ ارائه گردید.

آب مورد استفاده جهت ساخت طرح‌های مخلوط بتنی، آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه است. از فوق روان کننده بر

انجمن روسازی‌های بتنی آمریکا (ACPA) برای هر طرح اختلاط تعیین می‌شود. همچنین ارزیابی هزینه‌ی ساخت روسازی، با استفاده از شاخص هزینه‌ی ساخت یک متر مربع روسازی بتنی، انجام می‌گیرد.

۲-۱- مصالح و طرح اختلاط بتن روسازی بتنی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق مصالح سنگی رودخانه ای بوده که شامل مصالح سنگی ریز دانه با اندازه‌ی ۵-۰ میلی‌متر، مصالح سنگی درشت دانه در دو گروه ابعادی شامل مصالح سنگی با اندازه‌ی ۱۲-۵ میلی‌متر و مصالح سنگی با اندازه‌ی ۱۹-۱۲ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C33 می‌باشد. مدول نرمی، چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی ریز دانه مطابق با استانداردهای ASTM C128 و ASTM C33 به ترتیب به میزان ۲/۸، ۲/۶ و ۲/۹ درصد می‌باشد. چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۵ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۲/۵ و ۲/۵٪ و مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۱۹ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۲/۶ و ۲/۰٪ مطابق

1 www.drimco.com

جدول ۲. مشخصات فنی الیاف مورد استفاده در این تحقیق

Table 2. Technical properties of fibers used in this study

جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	در هم تابیده/شبه شبکه ای
طول (mm)	۵۴
قطر (mm)	۰.۴
مقاومت در محیط اسید/قلیا	عالی
مقاومت کششی (Mpa)	۶۹۳
مدول الاستیسیته (Gpa)	۶.۴
جذب آب (%)	ندارد
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۰.۹۱

جدول ۳. معیارهای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱

Table 3. Criteria for selecting proportions for concrete pavement mixture conforming to manual No. 731

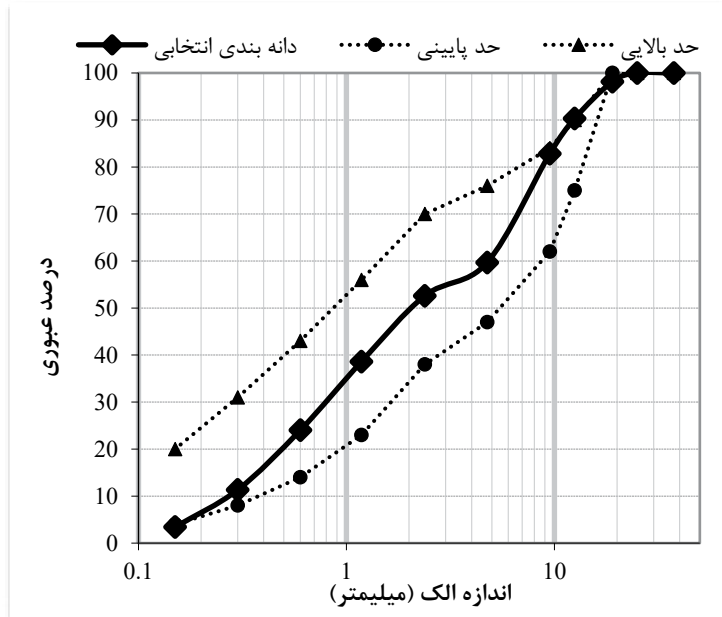
معیار	مقدار	روش انجام آزمایش
مقاومت فشاری (نمونه استوانه ای)	حداقل ۳۰ مگاپاسکال	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه)	حداقل ۴ مگاپاسکال	ASTM C78
اسلامپ	۷۰-۱۰ میلی‌متر	ASTM C143
عیار سیمان	حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب	-
نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)	حداکثر ۰.۵۳	-

پایه پلی کربوکسیلات اتر در ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس الزامات ذکر شده در ضابطه‌ی ۷۳۱، تعیین شده و از حدود مجاز آن پیروی می‌کند. الزامات در نظر گرفته شده در این تحقیق جهت تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی، مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱، در جدول ۳ آورده شده‌است.

با توجه به معیارهای مندرج در جدول ۳، نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد استفاده در این تحقیق، تعیین گردید. مقدار نسبت آب به مواد سیمانی به میزان ۰.۵، انتخاب شد. انتخاب این مقدار، باعث اختلاط بهتر الیاف در مخلوط شده و ساخت نمونه‌ها راحت تر انجام می‌شود. همچنین با توجه به کاهش خصوصیات مکانیکی بتن در سنین کمتر، نسبت به مقادیر نسبت آب به سیمان پایین تر، اثر الیاف در کنترل ترک‌خوردگی بهتر مشخص می‌شود. با این وجود، ممکن است این مقدار نسبت آب به سیمان، با مقادیر

انتخاب شده در اجرا، فاصله داشته باشد. اما با توجه به علت ذکر شده این انتخاب صورت گرفته است. همچنین این مقدار، از حداکثر مقدار نسبت آب به سیمان مجاز بتن روسازی بتنی (مندرج در جدول ۳)، کمتر می‌باشد. با توجه به مقدار اسلامپ هدف که به مقدار 60 ± 20 میلی‌متر در نظر گرفته شد و حداقل عیار سیمان بتن روسازی بتنی، مقدار عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. مقادیر سهم مصالح سنگی طوری صورت گرفت که دانه بندی مصالح سنگی در حدود بالا و پایین دانه بندی مصالح سنگی در بتن روسازی مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱، قرار گیرد. شکل ۲، حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

مقدار مصرف الیاف در طرح‌های اختلاط بتن الیافی به میزان ۰، ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم در متر مکعب بتن انتخاب گردید. این مقادیر الیاف به طرح اختلاط بتن روسازی افزوده شد. با توجه به این که افزودن الیاف باعث کاهش میزان روانی طرح مخلوط شاهد می‌شود،



شکل ۲. حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی

Fig. 2. Allowable and chosen gradations



شکل ۳. ساخت مخلوط‌های بتنی و ارزیابی اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143

Fig. 3. Concrete mixtures fabrication and evaluation of slump according to ASTM C143 standard

مقدار فوق روان‌کننده طوری انتخاب گردید که مقدار اسلامپ هدف در تمامی طرح‌های اختلاط حفظ گردد. این عمل، باعث عدم تغییرات زیاد کارایی مخلوط‌های بتنی و به دنبال آن کاهش تغییرات مقدار هوای غیر عمدی بتن می‌گردد و در نتیجه خصوصیات بتن تازه و سخت شده کمتر دستخوش تغییر می‌گردد [۱۱]. این مورد، با ساخت طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی و افزودن ماده‌ی فوق روان‌کننده به صورت آزمون و خطا و اندازه‌گیری اسلامپ مخلوط‌های بتن شاهد و الیافی مطابق با استاندارد ASTM C143، انجام گرفته و میزان مصرف ماده‌ی افزودنی جهت رسیدن به میزان اسلامپ در نظر گرفته شده، تعیین گردید. شکل ۳، ساخت و ارزیابی اسلامپ مخلوط‌های بتن الیافی، جهت تعیین میزان مصرف ماده‌ی فوق روان‌کننده برای رسیدن به اسلامپ هدف در طرح‌های اختلاط بتنی را نشان می‌دهد.

بدین ترتیب چهار طرح اختلاط شامل یک طرح اختلاط بتن شاهد و سه طرح اختلاط بتن الیافی در روند تحقیق، بررسی گردید. طرح اختلاط بتن شاهد (R)، طرح اختلاط بتن روسازی حاوی الیاف

مقدار فوق روان‌کننده طوری انتخاب گردید که مقدار اسلامپ هدف در تمامی طرح‌های اختلاط حفظ گردد. این عمل، باعث عدم تغییرات زیاد کارایی مخلوط‌های بتنی و به دنبال آن کاهش تغییرات مقدار هوای غیر عمدی بتن می‌گردد و در نتیجه خصوصیات بتن تازه و سخت شده کمتر دستخوش تغییر می‌گردد [۱۱]. این مورد، با ساخت طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی و افزودن ماده‌ی فوق روان‌کننده به صورت آزمون و خطا و اندازه‌گیری اسلامپ مخلوط‌های بتن شاهد و الیافی مطابق با استاندارد

جدول ۴. نسبت‌های وزنی طرح‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد بررسی در این تحقیق
Table 4. Proportions of concrete pavement mixtures examined in this study

نام طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	آب (Kg/m ³)	سیمان (Kg/m ³)	سنگدانه ریز (Kg/m ³)	سنگدانه درشت (Kg/m ³)	سنگدانه درشت (Kg/m ³)	فوق روان کننده (Kg/m ³)	الیاف ماکرو-سینتتیک (Kg/m ³)
شاهد	R	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰.۴۷	۰
الیافی	FR1	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰.۵۰	۱
الیافی	FR2	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰.۵۳	۲
الیافی	FR3	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰.۵۵	۳



شکل ۴. ساخت نمونه‌های استوانه‌ای جهت تعیین مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد ASTM C39

Fig. 4. Fabrication of cylindrical specimens to determine the compressive strength of concrete according to ASTM C39 standard

به میزان ۰.۴، ۰.۱، ۰.۱، ۰.۵ و ۰.۳ مگاپاسکال به دست آمد. با توجه به این نتایج، دیده می‌شود که هر دو معیار اسلامپ و مقاومت فشاری طرح مخلوط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱ (مندرج در جدول ۳) رعایت شده‌است. بنابراین می‌توان آزمایش‌های تعیین مقاومت و عملکرد خمشی را برای طرح‌های اختلاط بتن روسازی در نظر گرفته شده، انجام داد.

۲-۲- ارزیابی مقاومت و عملکرد خمشی طرح‌های اختلاط بتن روسازی

آزمایش‌های مقاومت و عملکرد خمشی جهت تعیین مدول

به میزان صفر بوده و مشخصات آن جهت طراحی روسازی بتنی در زردار ساده (بدون الیاف) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۴، نسبت‌های وزنی اختلاط طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی جهت ساخت یک متر مکعب بتن در حالت اشباع با سطح خشک مصالح سنگی، آورده شده‌است.

در ساخت مخلوط‌های بتنی و نمونه‌های آزمایش، جهت اطمینان از پخش یکنواخت الیاف در بتن و ایجاد همگنی مناسب در مخلوط‌های بتنی، ابتدا مصالح سنگی و سیمان به صورت خشک در یک مخلوط کن با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و به مدت دو دقیقه اختلاط گردید. سپس نیمی از آب اختلاط، اضافه شده و عملیات اختلاط با سرعت ۵۰ دور در دقیقه و به مدت دو دقیقه ادامه یافت. سپس نیم دیگر آب اختلاط به همراه فوق روان کننده اضافه شده و اختلاط با سرعت یکسان و به مدت ۴ دقیقه ادامه یافت. در آخرین مرحله، الیاف به مخلوط بتنی اضافه شده و به جهت اختلاط بهتر و رسیدن به یک مخلوط همگن، عملیات اختلاط به مدت دو دقیقه با سرعت ۷۰ دور در دقیقه صورت گرفت. تا هنگام اتمام ساخت نمونه‌های مورد نظر در آزمایش، عملیات اختلاط با سرعت ۳۰ دور در دقیقه انجام گرفت. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی جهت بررسی رعایت الزام حداقل مقاومت فشاری بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱ (مندرج در جدول ۳)، براساس استاندارد ASTM C39 و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ (شکل ۴) انجام شد. مقدار اسلامپ طرح‌های اختلاط R، FR1، FR2 و FR3 به ترتیب به میزان ۶۵، ۶۰، ۵۵ و ۵۰ میلی‌متر، و مقاومت فشاری آن‌ها به ترتیب



شکل ۵. تعیین مقاومت خمشی تیرهای بتنی مطابق با استاندارد ASTM C78

Fig. 5. Determining the flexural strength of concrete beams according to ASTM C78 standard

جهت بررسی عملکرد خمشی مخلوط‌های بتنی پس از ترک‌خوردگی و تعیین نسبت مقاومت خمشی معادل، از روش استاندارد ASTM C1609 استفاده شد. ابعاد تیر بتنی مورد استفاده در این آزمایش، مانند تیرهای بتنی در تعیین مقاومت خمشی در قسمت قبل می‌باشد. تعداد سه تیر بتنی برای هر طرح اختلاط بتن ساخته شده و تا سن ۲۸ روزه، در حوضچه‌های نگهداری، مطابق با استاندارد، نگهداری شدند. میانگین نتایج سه تیر بتنی، در نظر گرفته شد. در این آزمایش، تیر بتنی به روش بارگذاری در یک سوم دهانه بارگذاری شده و میزان تغییر شکل متناظر با بار وارد شده، توسط سیستم بارگذاری اندازه‌گیری می‌شود. پس از رسیدن به مقدار اولین بار حداکثر و ثبت تغییر مکان خالص متناظر با این مقدار، مقادیر بار متناظر با تغییر مکان‌های خالص ۰٫۵، ۰٫۷۵، ۱ و ۱٫۲۵ میلی‌متر ثبت شده و بارگذاری تیر بتنی تا رسیدن تغییر مکان خالص نمونه به میزان ۱/۱۵۰ دهانه (۳ میلی‌متر) ادامه می‌یابد. شکل ۶ نمودار نیرو-تغییر مکان خالص که از نتایج این آزمایش به‌دست می‌آید را نشان می‌دهد. مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل (R_{p3}) از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:

$$R_{e,3} = \frac{150T_{150}^d}{f_1 \cdot b \cdot d^2} \quad (2)$$

که در آن R_{p3} نسبت مقاومت خمشی معادل بر حسب درصد،

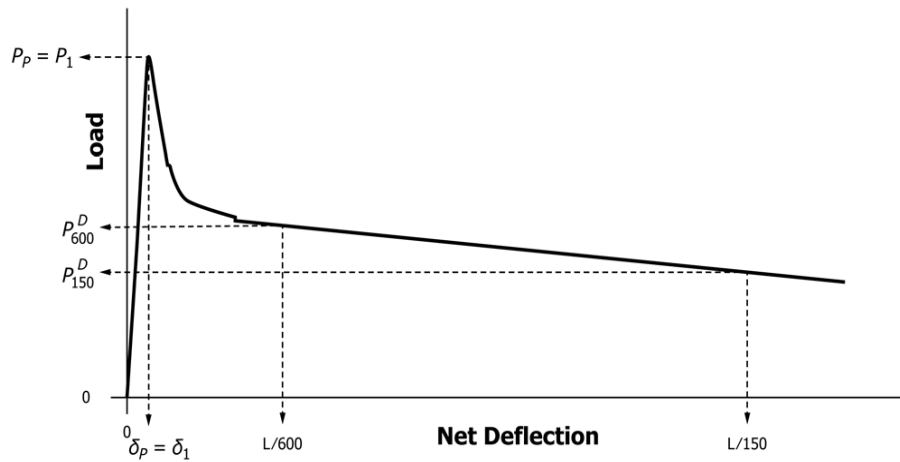
گسیختگی (MR) و نسبت مقاومت خمشی معادل (R_{e3}) مخلوط‌های بتنی شاهد و الیافی، مطابق استانداردهای ASTM C78 و ASTM C1609 انجام گرفت. این مشخصات در طراحی ضخامت دال روسازی درزدار، استفاده می‌گردد.

جهت تعیین مقاومت خمشی طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی در هنگام گسیختگی خمشی، از روش استاندارد ASTM C78 استفاده گردید. تیرهای بتنی با ابعاد $150 \times 150 \times 450$ میلی‌متر و با دهانه‌ی موثر (L) ۴۵۰ میلی‌متر ساخته شده و تا سن ۲۸ روزه در حوضچه‌های نگهداری، مطابق با استاندارد، نگهداری شدند. تعداد ۳ تیر از هر طرح اختلاط آزمایش شده و میانگین نتایج در نظر گرفته شد. شکل ۵، تصویر تیرهای بتنی پس از اتمام آزمایش را نشان می‌دهد.

با استفاده از نتایج این آزمایش، مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی (MR) طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی در هنگام گسیختگی خمشی، مطابق رابطه‌ی ۱ تعیین می‌گردد:

$$MR = \frac{P.L}{b.d^2} \quad (1)$$

که در آن، P حداکثر مقدار بار وارد شده توسط دستگاه آزمایش بر حسب نیوتون، L طول دهانه‌ی نمونه، b متوسط عرض مقطع در صفحه‌ی شکست بر حسب میلی‌متر و d متوسط عمق مقطع در صفحه‌ی شکست بر حسب میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۶. نمودار نیرو- تغییر مکان خالص تیر بتنی مطابق با روش آزمایش استاندارد ASTM C1609 [۳۰]

Fig. 6. Load-net deflection diagram of the concrete beam according to ASTM C1609 standard test method

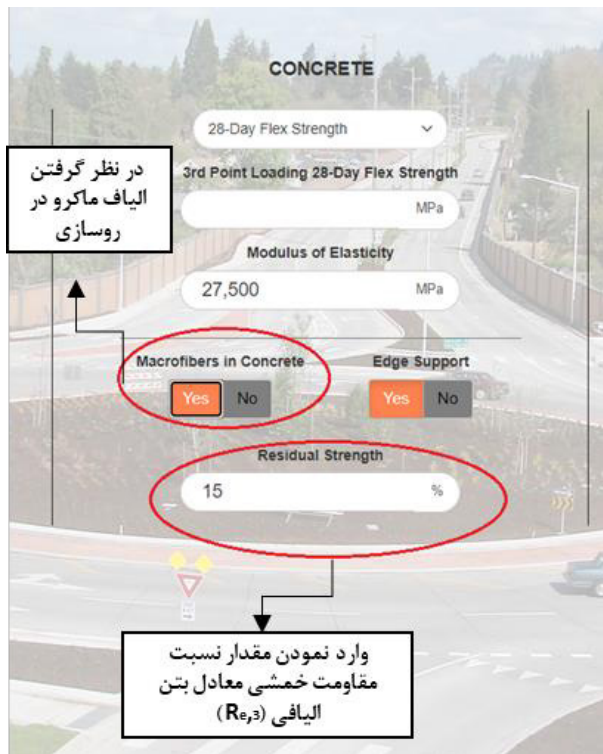


شکل ۷. تعیین عملکرد خمشی تیرهای بتنی مطابق با استاندارد ASTM C1609

Fig. 7. Determining the flexural performance of concrete beams according to ASTM C1609 standard

صفحه‌ی شکست بر حسب میلی‌متر و d متوسط عمق نمونه در صفحه‌ی شکست بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۷، نمونه‌های بتنی در حال آزمایش تعیین عملکرد خمشی را نشان می‌دهد.

T_{II}^d مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان خالص از مقدار ۰ تا مقدار دهانه $(L/150)$ بر حسب نیوتن در میلی‌متر، f_1 مقاومت نقطه‌ی اوج اول بر حسب مگاپاسکال، b متوسط عرض نمونه در



شکل ۸. در نظر گرفتن الیاف ماکرو در طراحی روسازی و وارد نمودن مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل بتن الیافی در برنامه طراحی روسازی بتنی

Fig. 8. Considering macro fibers in pavement design and inserting equivalent flexural strength ratio of fiber-reinforced concrete in the concrete pavement design program

و حدود پیشنهادی در برنامه در نظر گرفته شده است. مقادیر در نظر گرفته شده جهت طراحی روسازی، مطابق با الزامات ضابطه‌ی ۷۳۱ بوده و همچنین سعی بر نزدیکی این مقادیر با شرایط راه‌های شریانی اصلی کشور بوده است. در هر طرح مخلوط مورد بررسی، تمامی اطلاعات طراحی ثابت بوده و تنها مقدار مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل (برای مخلوط‌های بتن الیافی) متغیر می‌باشد. همچنین، طراحی روسازی، برای حالت با وجود میلگردهای داوول در نظر گرفته شده است. اطلاعات ثابت در نظر گرفته شده جهت طراحی روسازی بتنی در زردار در جدول ۵ دیده می‌شود.

در جدول ۶، مقادیر مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل هر طرح اختلاط بتن مورد بررسی در این تحقیق، که از آزمایش‌های انجام شده در قسمت‌های قبل به دست آمد، آورده شده است. مشاهده می‌شود که مدول گسیختگی همه طرح‌های مخلوط مورد بررسی، از مقدار حداقل مدول گسیختگی بتن روسازی

۳-۲- طراحی ضخامت دال روسازی بتنی در زردار

جهت طراحی ضخامت دال روسازی بتنی در زردار، از روش طراحی انجمن سیمان پرتلند (PCA) [۳۱] استفاده می‌گردد. انجمن روسازی‌های بتنی آمریکا (ACPA) با استفاده از مفاهیم ارائه شده در این روش، نرم افزار کامپیوتری را تحت عنوان StreetPave جهت طراحی روسازی‌های بتنی ارائه داده است. همچنین این برنامه به صورت تحت وب وجود داشته^۱ و بدون نیاز به نصب برنامه، امکان استفاده از آن وجود دارد که در این تحقیق از آن استفاده می‌گردد. این برنامه قابلیت طراحی روسازی‌های بتنی در زردار ساده، روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته و روسازی‌های بتن غلتکی را با در نظر گرفتن اطلاعات طراحی و مشخصات روسازی دارد. همچنین در صورت فقدان اطلاعات لازم برای هر قسمت، این برنامه حدود و پیشنهاداتی را بر اساس مشخصات طراحی و ملاحظات ذکر شده در روش طراحی و استانداردهای مرتبط، ارائه می‌کند. در این برنامه در صورت استفاده از الیاف ماکرو در روسازی بتنی می‌توان اثر این الیاف و مقاومت پس از ترک‌خوردگی ایجاد شده ناشی از افزودن آن را در طراحی روسازی در نظر گرفت. برای در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی بتن (برای طرح‌های اختلاط بتن حاوی الیاف)، می‌توان با انتخاب استفاده از الیاف ماکرو در برنامه و وارد نمودن مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل (R_{e3}) برای هر طرح مخلوط که از نتایج آزمایش‌های انجام شده در قسمت قبل به دست می‌آید و در برنامه با عنوان مقاومت پسماند^۲ مشخص شده است، (شکل ۸)، این اثر را در نظر گرفت. در این برنامه مقدار مدول گسیختگی هر طرح اختلاط بتن حاوی الیاف ماکرو، متناسب با مقدار R_{e3} متناسب با آن، افزایش یافته و طراحی ضخامت دال روسازی با در نظر گرفتن مدول گسیختگی افزایش یافته انجام می‌گیرد. روش‌های استفاده شده در این برنامه، توسط نویسندگان دیگر نیز به کار گرفته شده است [۲۷، ۲۸]. لازم به ذکر است که در طراحی روسازی در زردار ساده (ساخته شده با طرح اختلاط بتن شاهد)، اثر الیاف در طرح ضخامت روسازی، لحاظ نگردیده است.

اطلاعات در نظر گرفته شده در این تحقیق، برای طراحی روسازی بتنی مورد استفاده در آزاد راه و بزرگ راه بوده و با توجه به مقادیر

1 <https://www.pavementdesigner.org/>

2 Residual Strength

جدول ۵. مشخصات اطلاعات ورودی طراحی روسازی بتنی درزدار در برنامه طراحی روسازی بتنی

Table 5. Details of input data of jointed concrete pavement design in the concrete pavement design program

مقدار	مشخصه‌ی طراحی
طیف بار ترافیکی شریان اصلی (Major Arterial)	طیف بار ترافیکی (مطابق با روش طراحی PCA)
۳۰	عمر طراحی
۲٪ در سال	نرخ رشد ترافیک
۱۰۰۰	تعداد کامیون در روز
۵۰٪	توزیع جهتی
۱۰۰٪	توزیع خط طراحی
زیر اساس با مصالح سنگی به ضخامت ۱۰ سانتی متر	لایه‌ی زیر اساس
۲۸ MPa	مدول برجهنگی خاک بستر
۹۵٪	قابلیت اطمینان
۱۵٪	مقدار ترک خوردگی روسازی در انتهای عمر طراحی
در هر دو طرف وجود دارد	تکیه گاه کناری

جدول ۶. مشخصات مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق جهت طراحی روسازی

Table 6. Details of rupture modulus and equivalent flexural strength ratio of concrete mixtures examined in this study for pavement design

نسبت مقاومت خمشی معادل $(R_{e,3})$ (%)	مدول گسیختگی (MR) (MPa)	طرح اختلاط
۰	۴.۳	R
۱۵.۴۷	۴.۹۲	FR1
۲۹.۲۷	۵.۲۸	FR2
۳۹.۱۲	۵.۹۷	FR3

هزینه‌های جانبی دیگر (مانند هزینه‌های سربار) جهت ساخت یک متر مکعب روسازی بتنی، در نظر گرفته شده و شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی تعیین می‌گردد. این شاخص توسط علی و همکاران نیز به کار گرفته شده است [۲۹]. هزینه‌ی یک متر مکعب بتن آماده، براساس آنالیز قیمت ارشادی یک متر مکعب بتن آماده در سال ۹۹ با رده مقاومتی C25 و اسلامپ ۸ میلی‌متر در منطقه یک هر کارخانه با هزینه حمل و پمپاژ، که توسط انجمن صنفی تولید کنندگان بتن آماده و قطعات بتن ایران اعلام گردیده^۱ (هر متر مکعب ۳۸۹۹۴۶۰ ریال)، در نظر گرفته شده است. با وجود اینکه رده‌ی مقاومتی بتن روسازی و اسلامپ در این تحقیق، با مقادیر در نظر گرفته شده در این آنالیز قیمتی تفاوت دارد، اما این اختلاف کم بوده و همچنین با توجه به مقایسه‌ی ای بودن هدف تحقیق، این موضوع

بتنی مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱ (۴ مگاپاسکال) بیشتر بوده و بنابراین، این الزام روسازی بتنی را رعایت کرده است. همچنین، مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل مخلوط بتنی شاهد در آزمایش به مقدار صفر به دست آمد که این موضوع به دلیل عدم قابلیت باربری خمشی بیشتر نمونه‌های شاهد، پس از گسیختگی خمشی، می‌باشد.

بدین ترتیب ضخامت روسازی بتنی درزدار ساده، ساخته شده با طرح اختلاط بتن شاهد، و ضخامت روسازی‌های درزدار الیافی، ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن الیافی در مقادیر مختلف، با استفاده از برنامه‌ی طراحی روسازی، تعیین گردید.

۲-۴- ارزیابی اقتصادی طراحی ضخامت روسازی بتنی درزدار

جهت ارزیابی اقتصادی طراحی ضخامت روسازی‌های بتنی درزدار ساده و الیافی، هزینه‌های مربوط به مصالح، حمل، ساخت و

1 <https://betonngo.com/>

جدول ۷. هزینه‌ی یک متر مکعب بتن روسازی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق

Table 7. Cost of 1 m3 of jointed concrete pavement fabricated with concrete mixtures examined in this study

طرح اختلاط	هزینه‌ی یک متر مکعب بتن روسازی (ریال)
R	۴۰۱۶۹۶۰
FR1	۵۵۲۴۴۶۰
FR2	۷۰۳۱۹۶۰
FR3	۸۵۳۶۹۶۰

شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، تعیین شده و جهت ارزیابی اقتصادی، استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، بررسی اثر افزودن الیاف ماکرو سینتتیک بر ضخامت و هزینه‌های روسازی‌های بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط حاوی مقادیر مختلف الیاف ماکروسینتتیک، بررسی می‌گردد. شکل ۹، مقادیر ضخامت روسازی‌های بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتنی شاهد و الیافی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار دیده می‌شود که افزودن الیاف، باعث کاهش ضخامت روسازی بتنی درزدار الیافی نسبت به روسازی بتنی ساده می‌شود. این موضوع به دلیل افزایش مدول گسیختگی و در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی مخلوط‌های بتن‌های الیافی در طراحی ضخامت دال روسازی می‌باشد. با افزودن الیاف به میزان ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، ضخامت دال روسازی به ترتیب به میزان ۱۹، ۲۳ و ۲۵ درصد نسبت به دال بتنی شاهد، کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزودن الیاف به میزان ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، کاهش چشمگیری در ضخامت دال روسازی به وجود آمده، اما پس از افزودن الیاف به مقدار ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، این کاهش ضخامت روسازی چشمگیر تر نشده و به مقدار محسوسی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با مصرف بیشتر الیاف از مقدار ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، کاهش قابل چشمگیری بر ضخامت دال روسازی ایجاد نمی‌گردد.

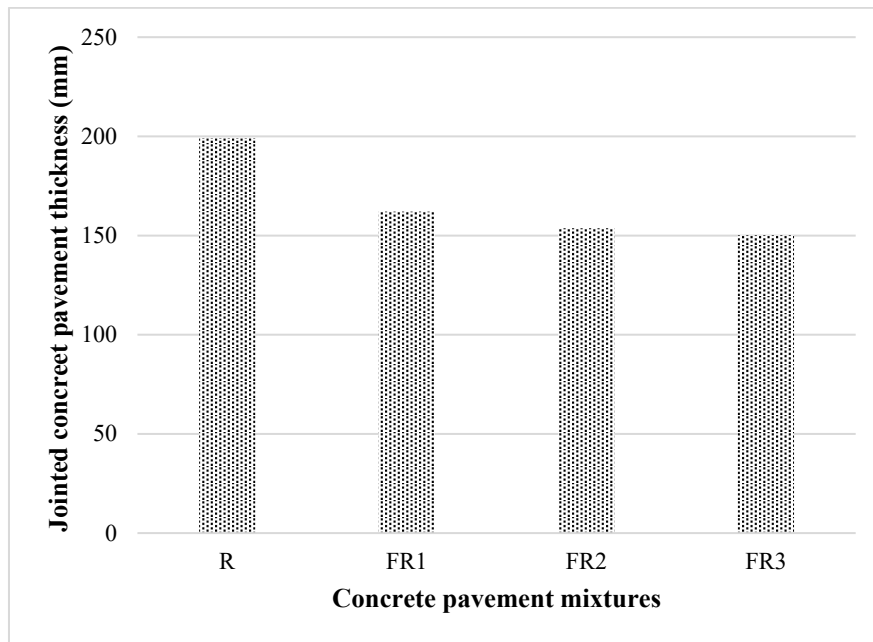
شکل ۱۰ و ۱۱ نمودار تغییرات ضخامت روسازی بتنی درزدار را نسبت به مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی هر یک از طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها می‌توان اینطور استنباط کرد که افزایش بیشتر مقاومت بتن

باعث ایجاد خطا در تحلیل اقتصادی نمی‌گردد. همچنین، در نظر گرفتن این مقدار هزینه، به شرایط اجرایی کشور نزدیک‌تر می‌باشد. هزینه‌ی فوق روان‌کننده و الیاف (در طرح‌های اختلاط بتن الیافی) که در هر طرح اختلاط بتن استفاده شده، نیز به هزینه‌ی یک متر مکعب بتن آماده، افزوده شد. هزینه‌ی فوق روان‌کننده (هر کیلوگرم ۲۵۰۰۰۰ ریال) و الیاف (هر کیلوگرم ۱۴۵۰۰۰۰ ریال)، براساس قیمت‌های اعلام شده توسط توزیع کننده هر یک از این مواد در سال ۹۹ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب هزینه‌ی هر متر مکعب بتن روسازی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، تعیین شده که این مقادیر در جدول ۷ دیده می‌شود.

از آن‌جا که هزینه‌های مربوط به ساخت جاده‌ها، معمولاً بر حسب قیمت واحد بر حسب متر مربع در نظر گرفته می‌شود، در این تحقیق نیز شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی بتنی بر اساس هزینه‌ی ساخت یک متر مربع روسازی، در نظر گرفته شده و مطابق با رابطه‌ی ۳، تعیین می‌گردد:

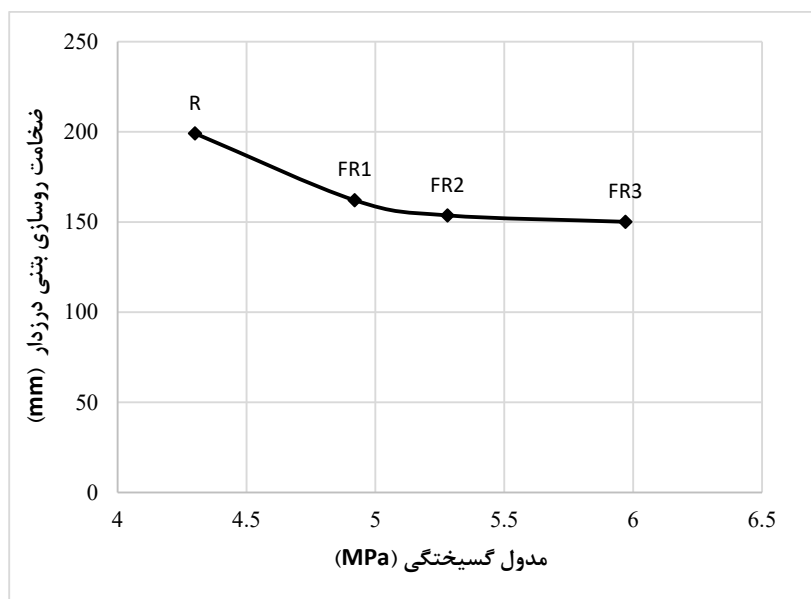
$$C = \frac{C_{concrete} * h_{design}}{1000} \quad (3)$$

که در آن C شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی درزدار بر حسب ریال بر متر مربع (IRR/m^2)، $C_{concrete}$ هزینه‌ی ساخت یک متر مکعب روسازی بتنی درزدار بر حسب ریال (IRR/m^3) و h_{design} ضخامت روسازی بتنی درزدار بر حسب میلی‌متر (mm) می‌باشد. این دو متغیر، برای هر طرح اختلاط بتنی مورد نظر در این تحقیق، مجزا می‌باشد. سپس می‌توان ارزیابی اقتصادی طراحی ضخامت روسازی بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی را براساس هزینه‌ی ساخت یک متر مربع روسازی (C) انجام داد. بدین ترتیب، شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی‌های بتنی درزدار ساخته



شکل ۹. مقادیر ضخامت روسازی بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی

Fig. 9. The thickness of jointed concrete pavement fabricated with reference and fiber-reinforced concrete mixtures



شکل ۱۰. تغییرات ضخامت نسبت به مدول گسیختگی روسازی بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی

Fig. 10. Changes of thickness relative to rupture modulus of jointed concrete pavement fabricated with reference and fiber-reinforced concrete mixtures

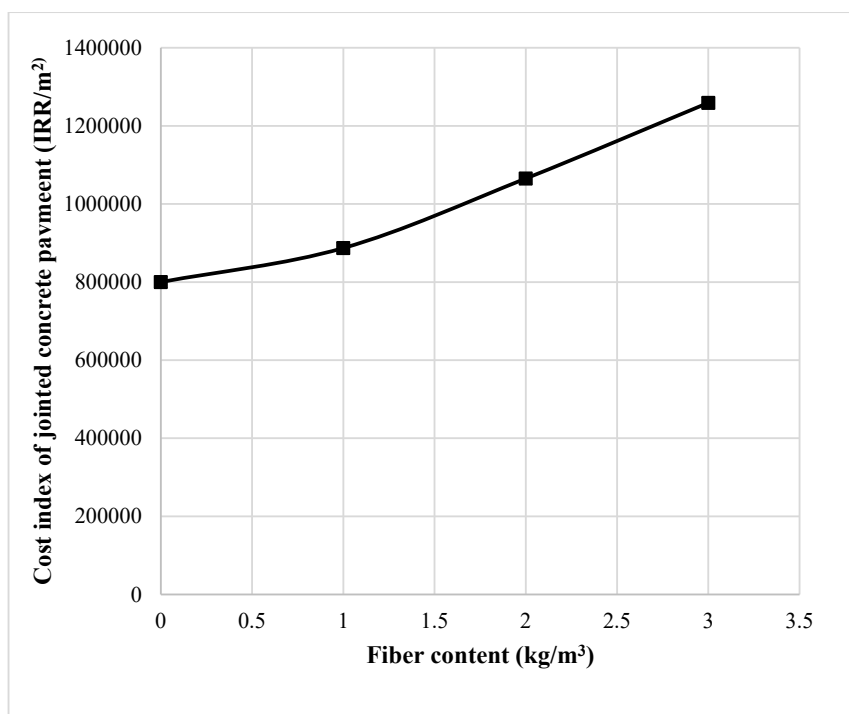
بهینه در این تحقیق به مقدار مصرف ۱ کیلوگرم بر متر مکعب نزدیک می‌باشد. لازم به ذکر است که این مقدار مصرف بهینه، تنها با در نظر گرفتن اثر الیاف بر کاهش ضخامت روسازی، می‌باشد.

شکل ۱۲، شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی بتنی درزدار شاهد و الیافی ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی را

در لحظه‌ی گسیختگی و پس از ترک خوردگی ناشی از افزودن بیشتر الیاف از یک میزان مصرف مشخص، باعث تغییر محسوس بیشتری در ضخامت روسازی نمی‌شود. این مقدار مصرف مشخص می‌تواند به عنوان میزان مصرف بهینه‌ی الیاف در کاهش ضخامت روسازی تلقی گردد. با توجه به نتایج این قسمت، دیده می‌شود که میزان مصرف



شکل ۱۱. تغییرات ضخامت نسبت به نسبت مقاومت خمشی معادل روسازی بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی
 Fig. 11. Changes of thickness relative to equivalent flexural strength ratio of jointed concrete pavement fabricated with reference and fiber-reinforced concrete mixtures



شکل ۱۲. شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی بتنی درزدار ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی
 Fig. 12. Construction cost index of jointed concrete pavement fabricated with reference and fiber-reinforced concrete mixtures

میزان ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم هزینه‌ی ساخت یک متر مربع بتن روسازی الیافی را به ترتیب به میزان ۱۰، ۳۳ و ۵۷ درصد نسبت به روسازی بتنی ساده افزایش می‌دهد. افزودن الیاف باعث تغییر همزمان دو

نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر نمودار، دیده می‌شود که افزودن الیاف، باعث افزایش هزینه‌ی ساخت یک متر مربع روسازی‌های بتنی الیافی نسبت به روسازی بتن ساده می‌گردد. افزودن الیاف به

امکان تعیین مقدار مصرف بهینه الیاف ماکروسینتتیک جهت کاهش ضخامت روسازی، وجود دارد. تعیین مقدار مصرف بهینه بر اساس این شاخص، باعث کاهش اقتصادی ضخامت روسازی می‌گردد. به بیان دیگر، در این مقدار مصرف بهینه الیاف، کاهش ضخامت روسازی به‌طوری انجام می‌گیرد که نرخ افزایش هزینه‌ی ساخت روسازی، کمترین میزان رشد خود را، نسبت به مقادیر مصرف دیگر داشته باشد. با توجه به این موضوع که مقدار مصرف الیاف ماکروسینتتیک در روسازی‌های بتنی جهت حصول عملکرد مناسب، معمولاً بیشتر از ۱ کیلوگرم بر متر مکعب توصیه می‌گردد، می‌توان مقدار مصرف بهینه‌ی الیاف جهت کاهش ضخامت طراحی روسازی در این تحقیق را به میزان ۱ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفت. این مقدار مصرف همچنین باعث کاهش زیاد کارایی بتن نشده و نیاز کمتری به انجام اقدامات اضافی و استفاده از مواد افزودنی بیشتر جهت حفظ کارایی بتن روسازی بتنی می‌باشد (این مورد در قسمت تعیین مقدار ماده‌ی افزودنی مورد نیاز جهت رسیدن به اسلامپ بررسی گردید). با این وجود جهت بررسی بیشتر و تعیین دقیق تر مقدار مصرف بهینه‌ی الیاف ماکروسینتتیک، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر الیاف ماکروسینتتیک در مقادیر مختلف بر ضخامت و هزینه‌ی ساخت روسازی‌های بتنی درزدار ساده و مسلح الیافی، با در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی بتن، بررسی گردید. مهم ترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- افزودن الیاف ماکروسینتتیک باعث کاهش ضخامت روسازی بتنی درزدار گردید (شکل ۹). علت این امر، افزایش مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل بتن، ناشی از افزودن الیاف بود (جدول ۶).

- افزودن الیاف تا میزان مصرف مشخص، قادر به کاهش چشمگیر ضخامت روسازی بتنی درزدار بوده اما پس از آن، با افزودن بیشتر الیاف، کاهش محسوس بیشتری در ضخامت روسازی، مشاهده نگردید (شکل ۹).

- دیده شد که افزایش مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل ناشی از افزودن الیاف، تا میزان مشخصی باعث

متغیر مرتبط با شاخص هزینه‌ی روسازی، شامل هزینه‌ی ساخت یک متر مکعب روسازی و ضخامت روسازی، می‌شود. افزایش هزینه‌ی ساخت یک متر مکعب روسازی به دلیل افزایش میزان مصرف الیاف و همچنین افزایش میزان مصرف ماده‌ی فوق روان‌کننده به دلیل حفظ اسلامپ بتن در محدوده‌ی هدف می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به مقادیر قیمت واحد ماده‌ی فوق روان‌کننده و الیاف مصرفی که در قسمت قبل ذکر شد، و همچنین اختلاف بین مصرف هر یک از این مواد در طرح‌های اختلاط بتن‌های الیافی با طرح اختلاط بتن شاهد، دیده می‌شود که اثر افزودن الیاف بر افزایش هزینه‌ی ساخت یک متر مربع روسازی‌های بتنی الیافی، بیشتر از اثر مصرف ماده‌ی فوق روان‌کننده بوده و بنابراین این الیاف هستند که نقش اصلی را در افزایش هزینه‌های ساخت بتن الیافی بازی می‌کنند. از طرفی به دلیل افزایش مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل با مصرف الیاف، ضخامت روسازی، که متغیر موثر دیگر بر شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی می‌باشد، کاهش می‌یابد.

با توجه به این نتایج نمودار شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که اثر افزودن الیاف در افزایش هزینه‌ی یک متر مکعب بتن الیافی بر اثر کاهش ضخامت روسازی ناشی از افزودن الیاف، غلبه کرده و نمودار همواره به صورت افزایشی رشد پیدا می‌کند. اما دیده می‌شود که با مصرف الیاف تا میزان ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، مقدار تغییر نرخ شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی، ملایم تر بوده و پس از آن، این شاخص با نرخ تند تری افزایش می‌یابد. مقدار شیب بین نقاط متناظر با مقادیر مصرف ۰ و ۱، ۱ و ۲، ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب به میزان ۸۷۱۹۸، ۱۷۸۰۹۸ و ۱۹۳۷۳۲ ریال در متر بر کیلوگرم (IRR.m/kg)، می‌باشد. می‌توان این طور استنباط کرد که اثر مثبت الیاف تا مقدار ۱ کیلوگرم بر متر مکعب بر کاهش ضخامت روسازی، قادر به کنترل نرخ رشد شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی می‌باشد. با افزودن بیشتر این الیاف، اثر مثبت آن بر کاهش ضخامت روسازی کمتر شده (این موضوع در نتایج قسمت قبل دیده شد) و از طرفی میزان هزینه‌ی ساخت یک متر مکعب بتن همواره به صورت افزایشی رشد پیدا می‌کند. در نتیجه، شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی، با مصرف بیشتر الیاف از مقدار ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، رشد بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، با در نظر گرفتن شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی که اثر کاهش ضخامت و هزینه‌ی ساخت روسازی را در نظر می‌گیرد،

کاهش ضخامت روسازی می‌شود. اما، افزایش بیشتر این دو متغیر، باعث کاهش چشمگیر بیشتری در ضخامت روسازی نگرددید (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

- رشد شاخص هزینه‌ی ساخت روسازی بتنی درزدار، همواره به صورت افزایشی بود. این موضوع نشان می‌دهد که با افزودن الیاف، اثر افزایش هزینه‌ی روسازی بتنی درزدار الیافی بر اثر کاهش ضخامت این روسازی‌ها، همواره غلبه می‌کند.

- افزایش شاخص هزینه‌ی روسازی بتنی درزدار الیافی در مقدار مصرف تا ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، با نرخ کمتری نسبت به دیگر مقادیر مصرف، رخ داد (شکل ۱۲). این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر مثبت این مقدار مصرف بر کاهش ضخامت روسازی قادر به کنترل افزایش هزینه‌های ساخت روسازی‌های بتنی درزدار الیافی، می‌باشد.

- با در نظر گرفتن اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک بر تغییرات شاخص هزینه‌ی ساخت، که اثر تغییرات ضخامت و هزینه‌ی ساخت روسازی را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد، می‌توان مقدار بهینه‌ی مصرف الیاف را تعیین کرد به‌طوری که در این مقدار مصرف بهینه، کاهش ضخامت به صورت اقتصادی انجام گرفته و با کنترل افزایش هزینه‌ی ساخت روسازی، همراه باشد.

- با توجه به حداقل مقدار مصرف الیاف ماکروسینتتیک جهت حصول نتایج مناسب در عملکرد روسازی، در این تحقیق، مقدار مصرف ۱ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان مقدار مصرف بهینه، تعیین گردید.

از نتایج این تحقیق دیده شد که اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک باعث کاهش چشم‌گیر ضخامت روسازی می‌گردد. در ساخت روسازی‌های بتنی درزدار ساده، استفاده از الیاف ماکروسینتتیک می‌تواند گزینه‌ی موثری جهت افزایش خصوصیات مقاومتی روسازی و کاهش ضخامت آن باشد. همچنین در صورتی که نیاز است تا از مواد و مصالحی جهت بهبود دیگر خصوصیات مکانیکی یا دوامی روسازی استفاده گردد و افزودن الیاف، یکی از گزینه‌های قابل انتخاب باشد، در نظر گرفتن اثر این الیاف در کاهش ضخامت روسازی که از نتایج این تحقیق به‌دست آمد، می‌تواند کمک شایانی به انتخاب موثرترین و اقتصادی‌ترین گزینه کند. در انتها لازم به ذکر است که در شاخص هزینه‌ی بررسی شده در این تحقیق، تنها اثر کاهش ضخامت و

هزینه‌ی ساخت بتن روسازی در نظر گرفته شد. واضح است که با کاهش ضخامت روسازی، میزان مصرف بتن کاهش یافته که می‌تواند باعث کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، میزان جمع‌شدگی‌های به‌وجود آمده در کوتاه مدت و بلند مدت و کاهش عرض و عمق ترک‌خوردگی‌ها شود. همچنین با وجود این که رابطه‌ی دقیق جهت تعیین مقدار فواصل ایجاد درز در روسازی‌های بتنی درزدار ساده وجود نداشته و بر اساس قضاوت مهندسی، شرایط محیطی، ملاحظات اجرایی و پیشنهادات آیین‌نامه‌ی تعیین می‌گردد، اما همانطور که در قسمت مقدمه این تحقیق بیان شد، با افزودن این الیاف که منجر به کنترل بیشتر ترک‌خوردگی‌های در روسازی‌های بتنی می‌گردد، می‌توان فواصل درزها را افزایش داد. این موضوع می‌تواند باعث کاهش میزان مصرف میلگردهای انتقال بار (داول)، زمان ساخت روسازی و هزینه‌های اجرایی ایجاد درز در روسازی‌های بتنی درزدار شود. مجموع این موارد می‌تواند منجر به کاهش بیشتر هزینه‌ها و همچنین اثرات زیست‌محیطی روسازی‌های بتنی درزدار الیافی نسبت به روسازی‌های ساده گردد. بنابراین با استفاده از نتایج این تحقیق و در نظر گرفتن مزایای ذکر شده، می‌توان به یک قضاوت مهندسی بهتر جهت استفاده از گزینه‌ی روسازی‌های بتنی درزدار الیافی با الیاف ماکروسینتتیک دست پیدا کرد و مقایسه‌ی موثرتری از نظر ملاحظات اقتصادی و اجرایی بین این روسازی، با دیگر روسازی‌های بتنی انجام داد. همچنین، لازم به ذکر است که استفاده از الیاف ماکرو سینتتیک در روسازی‌های بتنی می‌تواند در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی‌های به‌وجود آمده در مناطق سردسیر نیز موثر باشد. این ترک‌خوردگی‌ها ناشی از عوامل متعددی مانند، جمع‌شدگی دال بتنی ناشی از کاهش دما، ترک‌خوردگی‌های ناشی از سیکل‌های ذوب و یخبندان، بوده و وجود الیاف ماکرو در بتن، می‌تواند رشد این ترک‌خوردگی‌ها را کاهش داده که این موضوع باعث کاهش نفوذ پذیری آب و مواد خورنده از محل ترک‌خوردگی به داخل دال روسازی می‌گردد. همچنین عملکرد خمشی روسازی‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو سینتتیک که در مناطق سردسیر و تحت تاثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان قرار دارند، می‌تواند کمتر دستخوش تغییرات گردد. در نتیجه، افزودن این الیاف به روسازی بتنی در مناطق سردسیر می‌تواند منجر به افزایش دوام روسازی در بلند مدت گردد.

- mechanical properties of RCC pavements, *Construction and Building materials*, 26(1) (2012) 102-112.
- [14] H. Ma, Z. Zhang, Paving an engineered cementitious composite (ECC) overlay on concrete airfield pavement for reflective cracking resistance, *Construction and Building Materials*, 252 (2020) 119048.
- [15] H. Huang, H. Pang, J. Huang, H. Zhao, B. Liao, Synthesis and characterization of ground glass fiber reinforced polyurethane-based polymer concrete as a cementitious runway repair material, *Construction and Building Materials*, 242 (2020) 117221.
- [16] H. Rooholamini, A. Hassani, M. Aliha, Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology, *Construction and Building Materials*, 159 (2018) 517-529.
- [17] F. Xu, M. Zhou, J. Chen, S. Ruan, Mechanical performance evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified cement concrete road overlay material, *Construction and Building Materials*, 63 (2014) 142-149.
- [18] N. Salemi, K. Behfarnia, Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 934-941.
- [19] L. Lanzoni, A. Nobili, A.M. Tarantino, Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures, *Construction and building materials*, 28(1) (2012) 798-806.
- [20] I. Bertelsen, L. Ottosen, G. Fischer, Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Construction and Building Materials*, 230 (2020) 116769.
- [21] ASTM D7508 / D7508M-20, Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, in.
- [22] J.R. Roesler, V.G. Cervantes, A.N. Amirkhanian, Accelerated performance testing of concrete pavement with short slabs, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6) (2012) 494-507.
- [23] A. Bordelon, V. Cervantes, J.R. Roesler, Fracture properties of concrete containing recycled concrete
- [1] A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino, Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 888-895.
- [2] Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements No.731 in, The Ministry of Road & Urban Development. Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs 2017.(in Persian)
- [3] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.
- [4] P. Vijay, H. Li, V.H. GangaRao, Laboratory testing, field construction, and decade long performance evaluation of jointed plain concrete pavement with FRP dowels, *International Journal of Pavement Engineering*, 21(6) (2020) 713-724.
- [5] Y.H. Huang, Pavement analysis and design, 2004.
- [6] R.B. Mallick, T. El-Korchi, Pavement engineering: principles and practice, CRC Press, 2013.
- [7] M. Kayondo, R. Combrinck, W. Boshoff, State-of-the-art review on plastic cracking of concrete, *Construction and Building Materials*, 225 (2019) 886-899.
- [8] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P. Lura, On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 115 (2019) 251-263.
- [9] G. AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures. American, (1993).
- [10] D.K. Merritt, Feasibility of Using Precast Concrete Panels to Expedite Highway Pavement Construction, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 2000.
- [11] M. Wilson, S. Kosmatka, Design and control of concrete mixtures, Portland Cement Assn, Skokie, Ill, (2011).
- [12] N. Suksawang, A. Alsabbagh, A. Shaban, S. Wtaife, Using post-cracking strength to determine flexural capacity of ultra-thin whitetopping (UTW) pavements, *Construction and Building Materials*, 240 (2020) 117831.
- [13] M. Madhkhan, R. Azizkhani, M.T. Harchegani, Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on

- Building Materials, 166 (2018) 581-591.
- [28] M. Khan, A. Rehman, M. Ali, Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road, *Construction and Building Materials*, 244 (2020) 118382.
- [29] B. Ali, L.A. Qureshi, R. Kurda, Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement, *Composites Communications*, (2020) 100437.
- [30] ASTM C1609 / C1609M-19a, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, in.
- [31] R.G. Packard, Thickness design for concrete highway and street pavements, (1984).
- aggregates, *Magazine of Concrete Research*, 61(9) (2009) 665-670.
- [24] E. Silva, J. Coelho, J. Bordado, Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: Influence of fibres geometry and morphology, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 473-480.
- [25] S.A. Altoubat, J.R. Roesler, D.A. Lange, K.-A. Rieder, Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers, *Construction and Building Materials*, 22(3) (2008) 384-393.
- [26] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A.N. Amirkhanian, Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers, *Construction and Building Materials*, 135 (2017) 440-446.
- [27] M. Khan, M. Ali, Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads, *Construction and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Hassani, S.J. Vaziri Kang Olyaei, M.R. Hajizadeh, *Evaluation of the Effect of Macro-Synthetic Fibers on Thickness and Cost Index of Jointed Concrete Pavements Considering the Impact of Post-Cracking Flexural Strength*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(2) (2021) 767-784.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19050.7048](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19050.7048)

