

یافتن طرح اختلاط اقتصادی برای ساخت رویه‌های ترافیکی با بتن الیافی

علی شاهقاسی سلامی

دانشجو ارشد سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود.

ابراهیم زمانی *

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

چکیده

بتن معمولی ماده‌ای شکننده با مقاومت و ظرفیت کششی پایین است. در دهه‌های اخیر، برای رفع این محدودیت‌ها از الیاف جهت تقویت بتن استفاده شده است. یکی از مشکلاتی که تاکنون راهکار اجرایی و تجربی برای آن اندیشیده نشده است، میزان استفاده بهینه الیاف چه به لحاظ اقتصادی و چه به لحاظ رفتار آزمایشگاهی می‌باشد. در این پژوهش، دو نوع الیاف *macro twisted* و *PP* به صورت ترکیبی برای ساخت رویه‌های بتنی ترافیکی بررسی شدند. در ۲۱ طرح مختلف، درصد حجمی الیاف ماکرو از ۰ تا ۰/۱۶۵ درصد و پلی‌پروپیلن از ۰ تا ۰/۶۰۴ درصد تغییر کرده است. طرح‌ها از نظر مقاومت فشاری، کششی، خمشی، ضربه‌پذیری و جمع‌شدگی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد، اما مقاومت کششی و خمشی با افزایش الیاف بهبود یافت. ضربه‌پذیری بتن الیافی نیز تا ۵ برابر افزایش یافت. در نهایت، طرح بهینه شامل ۰/۱۱۰ درصد حجمی الیاف ماکرو و ۰/۱۶۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن بود.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، بهینه‌سازی اقتصادی، رویه‌های بتنی، الیاف ماکرو و میکرو.

* نویسنده مسئول: zamani.eb@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به توسعه شبکه حمل و نقل، نیاز به سیستم‌های حمل و نقل مدرن از یکسو و نیاز روز افزون به توسعه پایدار موجب گردیده، روسازی بتنی هر روزه مورد توجه بیشتری قرار گیرد. با توجه به اهمیت بهبود عملکرد روسازی های بتنی، این پژوهش به بررسی اثر ترکیب الیاف ماکرو سنتتیک توئیس و پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن الیافی می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، یافتن ترکیب بهینه ای از این الیاف برای دستیابی به بیشترین مقاومت خمشی، کششی و ضربه پذیری در عین حفظ کارایی و به طبع آن کاهش ضخامت روسازی است. در این تحقیق ۲۱ طرح اختلاط با دو نوع الیاف متفاوت شامل الیاف ماکرو سنتتیک توئیس و میکرو سنتتیک پلی پروپیلن با درصد حجمی بین ۰ تا ۰٫۱۶۵، برای الیاف توئیس و بین ۰ تا ۰٫۶۰۴، برای الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده قرار گرفت.

این تحقیق نسبت به پژوهش‌های قبلی از آن جهت متفاوت است که استفاده ترکیبی از دو نوع الیاف (توئیس و پلی پروپیلن) برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی، کاهش ضخامت روسازی و درصد الیاف بررسی شده است. این رویکرد نه تنها خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، بلکه به طور مستقیم به کاهش هزینه‌ها و مواد مصرفی در پروژه‌های ساخت و نگهداری روسازی‌های بتنی کمک می‌کند. از طرفی ارائه نوعی بتن الیافی که بتواند در روسازی های متنوع با بار ترافیک پایین باعث حذف میلگرد از روسازی گردد خود تحول نوینی در این زمینه خواهد بود که در گذشته مورد توجه نبوده است.

۲- مشخصات مصالح

مصالح استفاده شده در ساخت نمونه های بتنی شامل سیمان، آب، سنگ‌دانه طبیعی و الیاف پروپیلن الیاف ماکروسنتتیک توئیس و فوق روان کننده می‌باشد، در ادامه مشخصات هر یک از این مصالح ارائه می‌گردد:

۲-۱- سیمان

سیمان استفاده شده در پژوهش از شرکت سیمان شرق مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ می‌باشد. مشخصات سیمان مصرفی که توسط شرکت تولید کننده ارائه شده است در جدول ۱ آمده است [۱۳].

امروزه بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در سراسر جهان در میان مصالح مورد استفاده، در انواع کارهای مهندسی عمران به شمار می‌آید. فونداسیون‌ها و کف‌های سازه‌ای حجم زیادی از بتن مصرفی در پروژه‌ها را دربر می‌گیرند. برای به حداقل رساندن مصرف منابع طبیعی و جلوگیری از ضخامت زیاد دال‌ها و فونداسیون‌ها در طراحی، ارتقای مقاومت خمشی بتن معمولی با استفاده از مواد افزودنی مانند میلگردهای فولادی یا الیاف ضروری است. یکی از کاربردهای بتن، استفاده از آن در ساخت روسازی صلب است. این نوع روسازی به دلیل مزایای متعددی که نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر (مانند آسفالت) دارد، مورد توجه قرار می‌گیرد. از جمله این مزایا می‌توان به دوام بالا، مقاومت در برابر بارهای ترافیکی غیرمنتظره، عمر طولانی همراه با هزینه تعمیر کم و عملکرد مطلوب در شرایط مختلف محیطی اشاره کرد. از این رو استفاده از الیاف در بتن توسعه پیدا کرده است. بتن معمولی ماده‌ای ترد و شکننده با مقاومت و ظرفیت کششی پایین است. در طول چندین دهه گذشته به منظور مقابله با این مشکل تلاش‌های فراوانی، در جهت استفاده از الیاف برای تقویت بتن صورت گرفته است. می‌توان بیان کرد که با توجه به نوع الیاف، خواص مکانیکی بتن عملکرد بهتر از خود نشان داد. الیاف نسبت به بتن‌های مسلح با میلگرد فولادی دارای مزیت‌هایی است مانند توزیع بهتر آرماتور در کل ماتریس بتن، کاهش ترک خوردگی کششی، و افزایش قابل توجه در چقرمگی فشاری و خمشی و همچنین در شرایط محیطی شدید مانند چرخه های انجماد و ذوب، حملات اسیدی، محیط های کلرید، محیط های آب و غیره دوام بالایی دارد. تقریباً ۴۰ سال است که از الیاف در ساخت روسازی ها و دال های بتنی روی زمین استفاده می‌شود.

رولینگ (۱۹۸۱) عملکرد روسازی های بتن مسلح با الیاف فولادی برای فرودگاه‌ها را به طور خلاصه بیان کرد؛ او نتیجه گرفت که کسر حجمی ۱ تا ۲ درصد الیاف فولادی مقاومت خمشی بتن را ۳۵٪ افزایش داده است [۱-۲]. ورود رویه های بتنی به آمریکای شمالی در سال ۱۹۷۰ میلادی بوده است. در آمریکا این رویه ها را به طور موفقیت آمیز در تعدادی از مناطق مسکونی، تجاری، تسهیلات شهری نظیر پیاده روها و خیابان ها، بنادر و فرودگاه ها به کاربرده شده است [۳].

جدول ۳- مشخصات فنی الیاف PP بر اساس کاتالوگ سازنده

چگالی الیاف پروپیلن	0.91 gr/cm^3
ضخامت	دیر ۳
مقاومت کششی	$\text{MPa} 400 <$
طول	۱۲ تا ۶ mm
شکل ظاهری	الیاف تک رشته ای
محدوده دمای ذوب	۱۷۰ تا ۱۶۰ درجه سانتیگراد
جذب آب	ندارد
مقاومت در برابر اسید	بالا
مقاومت در محیط قلیایی	بالا

جدول ۴- مشخصات فنی الیاف تویست بر اساس سازنده

استاندارد	ASTM-D7508
مقاومت کششی	۵۵۰ MPa
مدول الاستیسیته	۵/۵۰ GPa
ازدیاد طول	۱۰٪
تعداد رشته	۱۵۰۰۰۰ در هر کیلوگرم
مقاومت اسیدی و قلیایی	عالی
جذب آب	ندارد
وزن مخصوص	0.91 gr/cm^3
طول	۵۰ و ۴۰ mm
قطر	۰/۳۰ mm
رنگ	مشکی طوسی و سفید
دمای ذوب	180°C
نوع الیاف	ماکرو سنتتیک

۳- طرح اختلاط

در این تحقیق ۲۱ طرح اختلاط با دو نوع الیاف متفاوت شامل الیاف ماکرو سنتتیک تویست و میکرو سنتتیک پلی پروپیلن با درصد حجمی بین ۰ تا ۱۶۵، برای الیاف تویست و بین ۰ تا ۶۰۴، برای الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۵ و ۶). از درصد های بیشتر از این به دلیل غیر قابل اجرایی بودن و افزایش هزینه صرف نظر شده است.

جدول ۵- ترکیب مصالح طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن (بر حسب کیلو گرم بر متر مکعب)	نام مصالح
وزن (کیلوگرم)	سیمان
۴۵۰	درصد آب به سیمان
۰/۴۰	ماسه
۱۲۰۰	شن
۷۰۰	

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات شیمیایی سیمان	استاندارد ملی
Al_2O_3	۴/۷۶ (%) حداکثر ۶
Fe_2O_3	۳/۴۴ (%) حداکثر ۶
CaO	۳۵/۶۳ (%) -
MgO	۲/۹۰ (%) حداکثر ۵
SO_3	۱/۹۹ (%) حداکثر ۳
SiO_2	۴۰/۲۰ (%) -

۲-۲- آب

آب استفاده شده در این پژوهش، آب شرب شهر مشهد می باشد. که بنا بر توصیه آیین نامه ۱۴-۳۱۸ ACI، الزامات استاندارد ASTM C1602/C1602M-12 را برآورده می سازد [۱۱-۱۲].

۲-۳- سنگ دانه طبیعی

آزمایش های لازم جهت بدست آوردن مشخصات سنگ دانه انجام شده است و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات سنگ دانه

آزمایش ها	نتایج
وزن مخصوص شن	$2670 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
وزن مخصوص ماسه	$2630 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
مدول نرمی ماسه	۳/۷۰
حداکثر قطر اسمی سنگ دانه	۱۹ (mm)

۲-۴- الیاف

دو نوع الیاف مختلف شامل الیاف های ماکرو سنتتیک تویست و پلی پروپیلن در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. الیاف تویست معمولاً طول ۴۰ تا ۵۰ میلیمتر و الیاف پلی پروپیلن طول ۶ تا ۱۲ میلیمتر دارند. مشخصات تکمیلی این الیاف ها در جدول ۳ و ۴ آمده است.

۲-۵- روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات استفاده شده است. مبنای طرح رسیدن به اسلامپ ۸ سانتیمتر بود که با افزودن مقدار کافی از فوق روان کننده و نسبت آب به سیمان ۰/۴ حاصل گردید. نتایج حاصل از این فوق روان کننده بسیار مطلوب بود.

جدول ۶- درصد حجمی الیاف

طرح	پلی پروپیلن (%)	توئیس (%)
شاهد	۰	۰
۱	۰	۰/۱۶۵
۲	۰/۶۰۴	۰/۱۶۵
۳	۰/۰۵۵	۰/۱۶۵
۴	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵
۵	۰/۲۷۵	۰/۱۶۵
۶	۰/۳۸۵	۰/۱۶۵
۷	۰/۴۹۵	۰/۱۶۵
۸	۰/۱۹۲	۰/۱۳۷
۹	۰/۲۲۰	۰/۱۱۰
۱۰	۰/۲۴۷	۰/۰۸۲
۱۱	۰/۱۹۲	۰/۱۱۰
۱۲	۰/۱۶۵	۰/۱۱۰
۱۳	۰/۱۳۷	۰/۱۱۰
۱۴	۰/۱۱۰	۰/۱۱۰
۱۵	۰/۰۸۲	۰/۰۸۲
۱۶	۰/۱۹۲	۰/۰۸۲
۱۷	۰/۱۳۷	۰/۰۸۲
۱۸	۰/۰۸۲	۰/۱۱۰
۱۹	۰/۰۵۵	۰/۱۱۰
۲۰	۰/۱۶۵	۰/۰۰۰

۴- برنامه آزمایش

در این پژوهش ابتدا با تحلیل نتایج دانه بندی چند نمونه برای رسیدن به طرح اختلاط شاهد ساخته شد پس از رسیدن به طرح نهایی اختلاط، ۲۱ طرح بتن الیافی و یک طرح شاهد طبق جدول ۷ تهیه گردید. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شد و برای عمل آوری در حوضچه آب قرار گرفت.

۵- آزمایش های انجام شده و نتایج

۵-۱- مقاومت فشاری

نمونه های مقاومت فشاری پس از ساخت و عمل آوری بر اساس استاندارد ۳۲۰۶ [۴] ایران در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۸ نشان داده شده است، این مقادیر، میانگین مقاومت فشاری دو نمونه هستند. پژوهش ها نشان می دهند که اثر الیاف بر مقاومت فشاری بتن الگوی ثابتی ندارد. افزایش محتوای هوا به دلیل حضور الیاف، یکی از دلایل کاهش مقاومت فشاری شناخته شده است که این امر احتمالاً باعث ایجاد پیوند ضعیف تر میان الیاف و ماتریس بتن می شود [۱۴].

جدول ۷- جزئیات نمونه های ساخته شده برای هر آزمایش

آزمایش	استاندارد	ابعاد	تعداد نمونه ها
			۷ روزه ۲۸ روزه
فشاری	ISIRI 3206	۱۵*۱۵*۱۵	۲ ۲
کششی	ASTM C 496	۱۵*۳۰	۱ —
خمشی	78 C ASTM	۱۰*۱۰*۳۵	۱ —
جمع شدگی	IS-1199	۷/۵*۷/۵*۲۸/۵	۱ —
ضربه	ACI 544.2R-18	۱۵*۶/۴	۱ —

۵-۲- مقاومت کششی (شکافت)

جدول ۹ آمده است [۵]. از آنجایی که بتن در کشش ضعیف می باشد، استفاده از الیاف باید بتواند این ضعف بتن را جبران کند. معمولاً الیاف با حجم پایین تأثیری دلخواهی بر مقاومت کششی ندارد. ضمن اینکه افزایش درصد الیاف تا هر مقدار دلخواهی هم افزایش مقاومت کششی یا طاقت خمشی را به دنبال نخواهد داشت. مقایسه طرح های ۴ با ۱۲ و ۸ با ۱۶ این مسئله را نمایان می سازد.

بر اساس استاندارد ASTM C496-90 تست کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت شکاف کششی بتن بر روی نمونه های استوانه قالب گیری شده ۱۵*۳۰ صورت گرفت و سپس بیشترین بار اعمال شده در زمان گسیختگی ثبت و مقاوت کششی دو نیم شدن با استفاده از روابط مرجع محاسبه گردید. نتایج این آزمایش در

که در آن W (J) جذب انرژی، N تعداد پرتابه گسیختگی، m (kg) جرم گوی، g (m/s²) گرانش زمین و h (m) ارتفاع پرتاب می باشد.

جدول ۹- مقاومت کششی شکافت نمونه ها		
ترکیب	مقاومت کششی شکافت ۲۸ روزه (MPa)	
طرح شاهد	۳/۳۷	
طرح ۱	۳/۴۵	
طرح ۲	۴/۲۸	
طرح ۳	۳/۳۰	
طرح ۴	۵/۲۵	
طرح ۵	۵/۱۷	
طرح ۶	۵/۴۸	
طرح ۷	۵/۴۵	
طرح ۸	۴/۵۰	
طرح ۹	۳/۶۴	
طرح ۱۰	۳/۴۲	
طرح ۱۱	۳/۴۳	
طرح ۱۲	۴/۱۲	
طرح ۱۳	۳/۶۵	
طرح ۱۴	۴/۱۰	
طرح ۱۵	۳/۷۰	
طرح ۱۶	۳/۳۳	
طرح ۱۷	۳/۴۷	
طرح ۱۸	۳/۷۱	
طرح ۱۹	۳/۱۹	
طرح ۲۰	۳/۵۸	

۵-۴- مقاومت خمشی

بر اساس استاندارد ASTM C78، مقاومت خمشی بتن با انجام آزمایش چهار نقطه ای تعیین میگردد. نمونه های خمشی ۴۰*۱۰*۱۰ سانتیمتری تحت اثر بار گذاری چهار نقطه ای قرار گرفت. نتایج مقاومت خمشی در جدول ۱۱ ارائه شده است [۸].

نتایج پژوهش های دیگر نشان می دهد که درصد حجمی الیاف تأثیر مستقیمی بر مقاومت خمشی بتن دارد. در واقع، حضور الیاف در حجمی مناسب و متعادل می تواند به بهبود قابل توجه مقاومت خمشی منجر شود. با این حال، هنگامی که درصد حجمی الیاف بسیار پایین باشد، اثر آن بر بهبود مقاومت خمشی ناچیز خواهد بود. از سوی دیگر، افزایش بیش از حد درصد حجمی الیاف نیز ممکن است به دلیل

جدول ۸- مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف

ترکیب	مقاومت فشاری (MPa)	
طرح شاهد	۴۰	۷ روزه
طرح ۱	۳۳/۹	۲۸ روزه
طرح ۲	۳۵/۴	۴۱/۵
طرح ۳	۳۴/۶	۳۶/۸۵
طرح ۴	۳۶/۲۵	۳۷/۰۵
طرح ۵	۳۴/۸	۳۸/۴۵
طرح ۶	۳۲/۹۵	۳۹
طرح ۷	۳۷/۱۵	۴۳/۳
طرح ۸	۳۰/۶	۴۱/۰۵
طرح ۹	۳۲/۲	۴۴/۴
طرح ۱۰	۳۱/۹	۳۷
طرح ۱۱	۳۳/۳۵	۳۹/۸۵
طرح ۱۲	۳۳/۷۵	۴۰/۰۵
طرح ۱۳	۳۳/۷۵	۴۲/۴۵
طرح ۱۴	۳۸/۹	۳۸/۲۵
طرح ۱۵	۳۷/۴	۳۴/۹۵
طرح ۱۶	۳۹/۴۵	۳۹
طرح ۱۷	۳۱/۳	۴۱/۵۳۵
طرح ۱۸	۳۷/۵	۴۳/۴۵
طرح ۱۹	۴۱/۶۵	۳۸/۹۵
طرح ۲۰	۳۴/۸	۴۳/۲۵
		۴۵/۶۵
		۳۷/۹۵

۵-۳- مقاومت ضربه

در این پژوهش با حفظ مقدار انرژی ضربه واحد، با استفاده از گوی ۳/۰۵ کیلویی از ارتفاع ۶۸ سانتیمتر بر نمونه های دیسکی شکل، ضربات متوالی وارد شد. دو مشخصه تعیین کننده مقاومت ضربه نمونه ها عبارتند از تعداد ضربات متناظر با اولین ترک قابل رویت، و تعداد ضربات لازم تا گسیختگی نهایی. نمونه ها در ۲۸ روزگی مورد آزمایش قرار گرفتند و مقدار انرژی جذب شده از رابطه (۱) بدست آمد. انرژی ضربه محاسبه شده در جدول (۱۰) آورده شده است [۶-۷]. همانطور که در آزمایش ضربه نشان داده شده افزودن الیاف به بتن به صورت کلی مقاومت ضربه را بالا می برد اما این مسئله به دوز ها و ترکیب های مختلف از الیاف نیز بستگی دارد، سایر پژوهش ها این مسئله را نیز تصدیق می کنند [۱۴].

$$W = N * m * g * h = 20.35 * N \quad (1)$$

مشکلاتی مانند تجمع الیاف یا کاهش یکنواختی ماتریس بتن، تأثیر منفی یا غیرقابل توجهی بر مقاومت خمشی داشته باشد [۱۴-۱۵-۱۶].

جدول ۱۰- انرژی ضربه

انرژی	تعداد پرتابه	تعداد پرتابه تا	ترکیب
ضربه	اولین ترک	گسیختگی	
(J)	(N)	(Nc)	
شاهد	۷۲۴۴	۳۵۵	۳۵۶
طرح ۱	۱۱۷۲۱	۵۸۲	۵۷۶
طرح ۲	۱۸۱۳۱	۸۳۵	۸۹۱
طرح ۳	۶۸۷۸	۳۲۱	۳۳۸
طرح ۴	۲۱۴۲۸	۱۰۱۵	۱۰۵۳
طرح ۵	۱۵۰۱۸	۷۱۲	۷۳۸
طرح ۶	۱۰۲۵۶	۴۴۸	۵۰۴
طرح ۷	۹۵۴۴	۴۵۲	۴۶۹
طرح ۸	۱۱۹۸۶	۵۶۳	۵۸۹
طرح ۹	۸۳۰۲	۳۸۶	۴۰۸
طرح ۱۰	۱۴۸۹۶	۷۲۶	۷۳۲
طرح ۱۱	۱۶۰۵۶	۷۵۸	۷۸۹
طرح ۱۲	۲۴۹۰۸	۱۱۶۱	۱۲۲۴
طرح ۱۳	۳۷۱۷۹	۱۷۹۵	۱۸۲۷
طرح ۱۴	۲۴۸۲۷	۱۲۱۲	۱۲۲۰
طرح ۱۵	۱۶۵۸۵	۷۵۶	۸۱۵
طرح ۱۶	۲۸۹۳۷	۱۴۰۷	۱۴۲۲
طرح ۱۷	۳۴۳۳۰	۱۶۳۲	۱۶۸۷
طرح ۱۸	۱۷۷۶۵	۸۴۹	۸۷۳
طرح ۱۹	۲۵۳۹۶	۱۱۲۹	۱۲۴۸
طرح ۲۰	۱۴۲۶۵	۶۹۵	۷۰۱

تا جایی تکرار می شود که طول اندازه گیری شده ثابت شود. زمانیکه اختلاف بین دو عدد متوالی در دوره ۴۴ ساعته خشک شدن، کمتر از ۰/۰۲ میلیمتر باشد مقدار جمع شدگی را می توان از اختلاف بین حالت خشک و اولیه که به صورت درصدی از طول اولیه می باشد، به دست آورد. کرنش جمع شدگی از رابطه (۲) محاسبه می شود [۹].

جدول ۱۱- مقاومت خمشی

ترکیب	مقاومت خمشی ۲۸ روزه (MPa)
طرح شاهد	۶/۶۶
طرح ۱	۶/۷۷
طرح ۲	۶/۷۰
طرح ۳	۷/۴۳
طرح ۴	۷/۷۶
طرح ۵	۷/۱۷
طرح ۶	۷/۵۴
طرح ۷	۷/۲۷
طرح ۸	۷/۳۳
طرح ۹	۷/۱۲
طرح ۱۰	۷/۵۳
طرح ۱۱	۷/۳۸
طرح ۱۲	۸/۱۴
طرح ۱۳	۷/۰۲
طرح ۱۴	۷/۲۰
طرح ۱۵	۷/۰۶
طرح ۱۶	۶/۹۲
طرح ۱۷	۶/۶۱
طرح ۱۸	۶/۷۶
طرح ۱۹	۶/۵۴
طرح ۲۰	۶/۵۶

۵-۵- آزمایش جمع شدگی

میزان جمع شدگی بنا به روش IS-1199: 1959 بر روی نمونه های ۲۸ روزه انجام و تعیین شد. نمونه تیرهای مکعبی شکل به ابعاد ۲۸۵*۷۵*۷۵ میلیمتر تهیه و به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری گردید تا آماده انجام آزمایش جمع شدگی شوند. پس از ۲۸ روز عمل آوری در دمای اتاق، طول اولیه نمونه ها به وسیله کولیس اندازه گیری و سپس وارد چرخه خشک شدن و سرد شدن می گردند، میزان تغییرات طول نمونه ثبت می شود. خشک شدن تحت دمای $\pm 50^\circ\text{C}$ درجه سانتیگراد و فرایند گرمادهی و سرد شدن،

نتایج آزمایش جمع شدگی که در جدول ۱۲ آمده است نشان می دهد که استفاده از الیاف به طور کلی باعث کاهش میزان جمع شدگی بتن می شود. با این حال، به نظر می رسد که الیاف توئیس تأثیر بیشتری در کاهش جمع شدگی دارند. این موضوع را می توان با یک مقایسه ساده بین طرح های ۱ و ۲۱ به وضوح مشاهده کرد.

$$\varepsilon = (L_f - L_i) / L \quad (2)$$

که در آن ε کرنش طولی نمونه، L_i کرنش اولیه و L_f کرنش نهایی نمونه می باشد.

محاسبه می‌شود. در این روش وقتی که تغییر مکان به مقدار یک به صد و پنجاهم طول دهانه نمونه برسد سطح زیر منحنی نیرو - تغییر مکان محاسبه شده و آن را با Tb نشان می‌دهند. بر اساس آئین نامه در این روش با طول دهانه ۴۰ سانتیمتر نهایت تا جابجایی ۲,۶۶ میلیمتر پیش می‌رویم، ضریب طاقت خمشی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۰]. نتایج در جدول ۱۳ نمایش داده شده است:

$$\sigma_b = Tb * \frac{L}{\Delta tb} * bh^2 \quad (3)$$

σ_b = ضریب طاقت خمشی (MPa)

Tb = طاقت خمشی (N.mm)

Δtb = جابه جایی (mm)

L = طول دهانه (mm)

b = عرض تیر (mm)

h = ارتفاع تیر (mm)

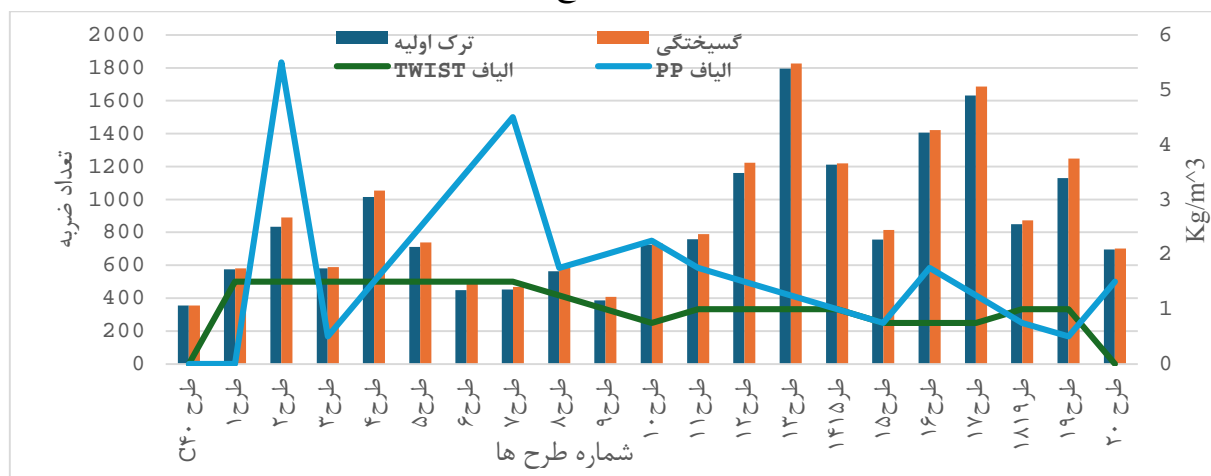
همان‌طور که در جداول (۱۱ و ۱۴) مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که کمترین میزان الیاف توئیت استفاده شده است، نمونه خمشی به طور کلی بار و تغییر مکان بیشتری نسبت به طرح شاهد نشان می‌دهد. اما در طرح‌هایی با بیشترین میزان الیاف توئیت، این مقادیر کاهش یافته و به عملکرد طرح شاهد نزدیک شده‌اند. با توجه به نمونه‌های آزمایش‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که عملاً افزایش حجم الیاف در بتن نمی‌تواند طاقت خمشی را به میزان قابل توجهی افزایش بدهد و در برخی حالات حتی ممکن است منجر کاهش مقاومت خمشی شود (مقایسه طرح‌های ۴ و ۱۲ یا طرح‌های ۸ و ۱۶).

جدول ۱۲- نتایج جمع شدگی نمونه‌ها

ترکیب	طول اولیه (mm)	تغییر طول (mm)
طرح شاهد	۲۸۶۰۵	۰/۲۵
طرح ۱	۲۸۶۱۰	۰/۱۵
طرح ۲	۲۸۵۸۰	۰/۱۵
طرح ۳	۲۸۵۶۰	۰/۱۰
طرح ۴	۲۸۵۸۰	۰/۰۵
طرح ۵	۲۸۵۷۰	۰/۱۰
طرح ۶	۲۸۵۸۵	۰/۱۵
طرح ۷	۲۸۶۴۰	۰/۱۵
طرح ۸	۲۸۶۲۰	۰/۱۰
طرح ۹	۲۸۶۱۰	۰/۰۵
طرح ۱۰	۲۸۵۲۵	۰/۱۵
طرح ۱۱	۲۸۶۳۰	۰/۰
طرح ۱۲	۲۸۵۹۵	۰/۱۵
طرح ۱۳	۲۸۵۳۰	۰/۰۵
طرح ۱۴	۲۸۵۸۵	۰/۰
طرح ۱۵	۲۸۶۰۵	۰/۰۵
طرح ۱۶	۲۸۶۱۰	۰/۲۰
طرح ۱۷	۲۸۶۳۰	۰/۲۰
طرح ۱۸	۲۸۶۲۰	۰/۰
طرح ۱۹	۲۸۶۰۵	۰/۱۵
طرح ۲۰	۲۸۶۴۵	۰/۱۵

۵-۶- طاقت خمشی

یکی از ویژگی‌های مثبتی که الیاف به بتن می‌افزاید خاصیت طاقت خمشی می‌باشد که نشان دهنده ی جذب انرژی بیشتر توسط بتن است. این ویژگی با محاسبه مساحت زیر سطح نمودار بار- تغییر مکان در آزمایش مقاومت خمشی طبق استاندارد JSCE-Sf ژاپن



شکل ۱- مقایسه ضربه پذیری طرح‌ها با طرح شاهد

جدول ۱۳- نتایج طاقت خمشی

ترکیب	حداکثر بار (N)	حداکثر تغییر مکان (mm)	طاقت خمشی (N/mm)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
شاهد	۱۶۶۶۵	۱/۸۴	۱۲۱۴۶	-
۱	۱۲۶۱۵	۱/۶۸	۱۱۷۱۸	-۳/۵۲
۲	۱۲۴۵۸	۲/۳۷	۷۵۵۱/۶	-۳۷/۸۲
۳	۱۴۳۱۷	۱/۸۳	۸۴۷۲	-۳۰
۴	۱۹۴۱۲	۱/۶۲	۱۰۹۶۰	-۱۰/۸۲
۵	۱۷۹۳۶	۱/۵۱	۱۰۷۶۶	-۱۲/۸۲
۶	۱۸۸۴۷	۱/۹۱	۱۲۲۹۰	۱/۱۸
۷	۱۸۱۶۵	۱/۶۸	۱۱۴۴۶	-۶/۱۲
۸	۱۸۳۲۳	۱/۶۶	۱۳۳۷۳	۹/۱۸
۹	۱۸۳۷۱	۱/۵۲	۱۰۴۷۵	-۱۵/۹۵
۱۰	۱۵۳۰۹	۲	۸۹۱۳	-۳۶/۲۷
۱۱	۱۸۸۱۶	۲/۲۸	۱۵۳۰۴	۲۰/۶۴
۱۲	۱۸۴۳۹	۱/۲۲	۹۲۸۳	-۳۰/۸۴
۱۳	۲۰۳۴۰	۲/۱۷	۱۳۱۹۲	۷/۹۳
۱۴	۱۷۵۵۶	۱/۶۶	۱۰۴۴۷	-۱۶/۲۶
۱۵	۱۷۹۹۴	۱/۸۰	۱۲۷۱۸	۵/۴
۱۶	۱۷۶۶۲	۱/۹۵	۱۸۱۸۰	۳۳/۲
۱۷	۱۷۲۹۴	۲/۰۹	۱۶۱۳۹	۲۴/۷۵
۱۸	۱۵۵۲۶	۱/۳۵	۱۵۲۷۲	۲۴/۴۷
۱۹	۱۶۸۹۶	۲/۶۶	۱۳۱۵۷	۷/۶۹
۲۰	۱۴۸۷۳	۲/۶۶	۱۰۷۹۷	-۱۲/۵
۲۱	۱۶۴۰۰	۱/۸۰	۱۴۸۹۵	۱۸/۸۶

۵-۷- مقایسه ضخامت طراحی

به صورت دستی، AAshto با استفاده از حل گر EES^۱ و روش Street pave کاملاً با نرم افزار انجام شد. مقایسه تفاوت ضخامت بین بتن معمولی و بتن الیافی در جدول ۱۴ ارائه شده است. در هر روش طراحی داده های یکسان استفاده شده است، در طراحی ضخامت با الیاف مشخصات مکانیکی طرح ۱۳ دارای الیاف توئیس ۰/۱۱۰ و پلی پروپیلن ۰/۱۶۵ مد نظر بود. در واقع تغییر مشخصات مکانیکی بتن معمولی با بتن الیافی تغییر ضخامت را رقم زده است.

از آنجایی که هدف این پژوهش کاهش ضخامت رویه بتنی، حذف میلگرد و به تبع آن کاهش هزینه های اجرایی می باشد مطلوب است ضخامت به روش های مختلف طراحی و مقایسه گردد. در بخش طراحی سه روش Yield line method بر اساس ACI 360R-10، نرم افزار 12 Street pave و AAshto مد نظر می باشد. در طراحی این سه روش باید گفت Yield line method

جدول ۱۴- مقایسه ضخامت روسازی با سه روش طراحی

روش طراحی	ضخامت با بتن معمولی (mm)	ضخامت با بتن الیافی (mm)	تغییرات نسبت به روسازی با بتن معمولی
Street pave	۱۳۸	۱۳۰	-۷/۵
AASHTO	۱۹۵	۱۷۲	-۱۳٪
ACI	۱۱۴	۱۰۲	-۱۲٪/۵

¹ Engineering Equation Solver

روسازی با بتن معمولی با میلگرد و روسازی آسفالتی انجام پرداخته می شود.

برای درک بهتر یک نمونه جاده دو بانده در نظر گرفته شد و هزینه شبکه مش و میلگرد دوخت همراه با هزینه قالب بندی و آرماتور بندی محاسبه شد.

همچنین میزان هزینه الیاف با طرح بهینه بتن الیافی با ضخامت طراحی محاسبه شد و با هم از نظر قیمت مقایسه گردیدند که نتایج حاصل در جدول ۱۵ ارائه شده است.

همانطور که ملاحظه می گردد از آنجاییکه قیمت آسفالت بیشتر از قیمت بتن معمولی در هر متر مربع می باشد (بر اساس فهرست بهای سال ۱۴۰۵)، استفاده از آن در رویه و اساس کاملاً غیر اقتصادی است. همچنین بتن الیافی با توجه به هزینه پایین تر اجرای آن به لحاظ اقتصادی نسبت به بتن معمولی با میلگرد برتری دارد.

۶- ارزیابی اقتصادی

در ذیل به مقایسه ای بین قیمت بهینه ترین طرح بتن الیافی با قیمت

جدول ۱۵- مقایسه قیمت بین اجرای روسازی آسفالتی، بتن مسلح معمولی با میلگرد و بتن الیافی

نوع روسازی	قیمت هر متر مربع روسازی (ریال)	اختلاف قیمت (%)
روسازی صلب با بتن مسلح معمولی (ضخامت ۱۵ سانتیمتر)	۲۳/۴۰۰/۰۰۰	-
روسازی صلب با بتن مسلح الیافی (۱۳ سانتیمتر)	۶/۲۶۵/۰۰۰	-۷۳
روسازی آسفالتی (۲۲ سانتیمتر رویه+بندبر+اساس)	۳۵/۲۸۰/۰۰۰	+۵۱

۷- نتیجه گیری

برابر نسبت به طرح شاهد افزایش انرژی ضربه ای نشان داد. از نظر جمع شدگی، الیاف توئیت تأثیر بیشتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن داشتند، به ویژه در مقایسه طرح های ۱ و ۲۱ که نشان دهنده عملکرد بهتر الیاف توئیت در مقابل ترک خوردگی ناشی از خشک شدن است. همچنین، الیاف توئیت به دلیل سطح صاف خود نمی توانند مقاومتی مؤثر در برابر خمشی ایجاد کنند و به راحتی از ماتریس بتن خارج می شوند. بیشترین مقاومت خمشی در طرح ۱۷ با ۰,۰۸۲ درصد حجمی الیاف توئیت و ۰,۱۹۲ درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن به دست آمد.

در طراحی ضخامت روسازی، بتن الیافی نسبت به بتن ساده در روش های مختلف کاهش ضخامت را نشان داد. در روش Yield line، ضخامت بتن الیافی ۱۲,۵ درصد کاهش یافت، در حالی که در نرم افزار Street Pave این کاهش ۵,۷ درصد و در روش آشتو ۱۳ درصد بود.

جدول (۱۴) به خوبی نشان می دهد که وجود الیاف باعث کاهش ضخامت طراحی روسازی می شود، با مقایسه درصد تغییرات ضخامت در روش Aashto و Yield line می توان بیان کرد این دو روش طراحی نتایج بسیار نزدیک به هم را نشان می دهد اما با روش Street pave اختلاف دارند.

نتیجه گیری اقتصادی: به واسطه کاهش ضخامت روسازی و حذف

در این پژوهش، ترکیب الیاف توئیت و پلی پروپیلن (PP) در بتن ترافیکی به منظور بهبود خواص مکانیکی و کاهش ضخامت روسازی بررسی شد همچنین از دوز های بالای الیاف توئیت به منظور کاهش هزینه ها صرف نظر شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری در طرح ۲۰ با درصد حجمی ۰,۱۱۰ الیاف توئیت و ۰,۰۵۵ الیاف پلی پروپیلن مشاهده شد که نسبت به طرح شاهد ۹,۲ درصد افزایش داشت. کمترین مقاومت فشاری در طرح ۱۴ با درصد حجمی ۰,۱۱۰ الیاف توئیت و ۰,۱۳۷ الیاف پلی پروپیلن ثبت شد.

در زمینه مقاومت خمشی، طرح ۱۳ با ۰,۱۱۰ درصد حجمی الیاف توئیت و ۰,۱۶۵ درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن بیشترین افزایش مقاومت خمشی را با ۱۸,۲ درصد نسبت به طرح شاهد نشان داد. علاوه بر این، افزایش درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن تا ۰,۵۴۹ به افزایش مقاومت خمشی کمک کرد.

بیشترین مقاومت کششی در طرح ۶ با ۰,۱۶۵ درصد حجمی الیاف توئیت و ۰,۳۸۵ درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن مشاهده شد که در آن، مقاومت کششی ۳۸,۲ درصد نسبت به طرح شاهد بهبود یافت.

در زمینه انرژی ضربه ای، طرح ۱۴ بهترین عملکرد را داشت و ۵,۱۳

- [۱۲]. استاندارد ملی ایران ۳۸۹. (۱۳۹۹). سیمان پرتلند-ویژگی ها .
- [13]. Goel, P., Kumar, R., & Bhattacharjee, B. (2022). Hybrid Fiber Reinforced Concrete Composite for Construction of Rigid Pavements. *Journal of Cement Based Composites*, 1, 5630 .
- [14]. Merhej, T., Cheng, L. L., & Feng, D. C. (2011). Polypropylene fiber reinforced concrete for rigid airfield pavement. *Advanced Materials Research*, 228, 627-633 .
- [15]. Kabashi, N., Krasniqi, C., Hadri, R., & Sadikaj, A. (2018). Effect of Fibre Reinforced Concrete and Behaviour in Rigid Pavement. *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res*, 7(1), 29-33.

میلگرد به نسبت بتن معمولی، استفاده از بتن الیافی می تواند منجر به صرفه جویی در مصرف مواد و کاهش هزینه های نگهداری در طول عمر سازه شود. به ویژه در پروژه های بزرگ، کاهش ضخامت بتن می تواند هزینه های تولید و حمل و نقل را کاهش دهد. همچنین، بهبود خواص مکانیکی بتن الیافی می تواند نیاز به نگهداری و تعمیرات را کاهش دهد، که خود موجب صرفه جویی در هزینه های بلندمدت می شود

۸- مراجع

- [1]. Rollings, R. S. (1981). Corps of engineers design procedures for rigid airfield pavements. *Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Pavement Design*, held at Purdue University, April 14-16, 1981 .
- [2]. Rollings, R. S. (1989). DEVELOPMENTS IN THE CORPS OF ENGINEERS RIGID AIRFIELD DESIGN PROCEDURES. *PROCEEDINGS, 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND REHABILITATION, PURDUE UNIVERSITY, APRIL 18-20, 1989*. Publication of: Purdue University(FHWA-RD-89-208) .
- [3]. Altoubat, S. A., Roesler, J. R., Lange, D. A., & Rieder, K.-A. (2008). Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Construction and Building Materials*, 22(3), 384-393 .
- [۴]. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. (۱۳۷۰). تعیین مقاومت فشاری آزمون های بتن .
- [5]. ASTM C496/C496M, (2004). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete
- [6]. ACI. (544.4R-18). ACI 544.4R-18. In.
- [7]. ASTM D1557, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ 2,700 kN-m/m³)
- [8]. ASTM C78, A.C., Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). 2008.
- [9]. IS:1199-1959. (1959). METHODS OF SAMPLING AND ANALYSIS OF CONCRETE In.
- [10]. ACI. (544.4R-18). ACI 544.4R-18. Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete. In.
- [11]. ASTM C1602/C1602M, (2012). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. In.

Governing an economic admixture design of fiber concrete for traffic slabs

Ali Shahghasi Salami

M.Sc. student, Shahrood university of Technology.

Ebrahim Zamani *

Assistant Professor, Shahrood university of Technology.

Abstract

Conventional concrete is a brittle material characterized by low tensile strength and capacity. In recent decades, the incorporation of fibers has been widely utilized to overcome these limitations in concrete applications. A key unresolved challenge, lacking practical and empirical solutions, pertains to determining the optimal dosage of fibers from both an economic and a laboratory performance standpoint. This research investigates the combined use of macro-twisted and Polypropylene (PP) fibers specifically for the construction of traffic-bearing concrete overlays. Twenty-one distinct mix designs were formulated, systematically varying the volume fraction of macro fibers from 0% to 0.165% and PP fibers from 0% to 0.604%. These mixtures were evaluated based on compressive strength, tensile strength, flexural strength, impact resistance, and shrinkage. The results demonstrated that fiber addition had a negligible effect on compressive strength but significantly improved both tensile and flexural strengths with increasing fiber content. Furthermore, the impact resistance of the fiber-reinforced concrete increased by up to five times. Ultimately, the optimized design consisted of 0.110% macro fibers and 0.165% polypropylene fibers.

Keywords: Fiber-reinforced concrete, economic optimization, concrete pavements, macro fibers and microfibers.

* Corresponding Author: zamani.eb@shahroodut.ac.ir

