





دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابل های فشار قوی بازیافتی از جنس پلی اتیلن کراس

لینک به عنوان سنگدانه در مخلوط روسازی بتن غلتکی

نگارنده:

محسن شمسایی

استاد راهنما

دکتر ایمان آقایان

استاد مشاور

مهندس کانی اخوان کاظمی

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : عمران

گروه : مهندسی راه و ترابری

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محسن شمسایی به شماره دانشجویی: ۹۳۱۰۵۳۴

تحت عنوان: بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابل های فشار قوی بازیافتی از جنس پلی

اتیلن کراس لینک به عنوان سنگدانه در مخلوط روسازی بتن غلتکی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

پدر عزیز و مادر مهربانم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه اثار و از خودگذشتگی

و به پاس محبت‌های بی‌دینشان که مرکز فروکش نمی‌کند

و به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادش است.

قدردانی

برنام یگز خالق هستی

به رسم ادب بر خود لازم می‌دانم که از زحمات با ارزش استاد راهنمای بسیار گرانقدرم، جناب آقای دکتر ایمان آقایان و استاد مشاور، خانم مهندس کانی اخوان کاظمی که مرا در این پروسه‌ی سخت یاری نموده و هیچ‌گونه راهنمایی را از من دریغ نداشته و علاوه بر اندیشه‌ها، اندیشیدن را نیز به من آموخته اند، کمال تشکر را داشته باشم.

همچنین از تمام دوستانی که مرا در پیشبرد این پایان نامه یاری نموده‌اند، صمیمانه متشکرم و از صمیم قلب از درگاه خداوند منان برایشان بهترین‌ها را آرزو دارم.

تعهد نامه

این جانب محسن شمسایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابل های فشار قوی بازیافتی از جنس پلی اتیلن کراس لینک به عنوان سنگدانه در مخلوط روسازی بتن غلتکی تحت راهنمایی دکتر ایمان آقایان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود میباشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمیشود.

چکیده:

روسازی بتن غلتکی (RCCP)^۱ یکی از انواع روسازی بتنی است که به دلیل روش اجرای آسان و عدم نیاز به آرماتور فولادی، مدت ها است که مورد توجه قرار گرفته است. RCCP برخلاف سایر روسازی های بتنی به اندازه ای خشک است که می توان در زمان اجرا آن را به وسیله ی غلتک متراکم کرد. با توجه به رشد ضایعات صنایع، محققین به استفاده از این ضایعات در روسازی بتن غلتکی گرایش پیدا کرده اند. سالانه مقدار زیادی سیم و کابل فشارقوی برق تولید می شود که این تولیدات مقدار زیادی ضایعات دارد. یکی از این ضایعات مربوط به پلی اتیلن کراس لینک (XLPE)^۲ است که در این سال ها به سرعت در حال افزایش است. در واقع XLPE ماده ای تجزیه ناپذیر است که به عنوان عایق کابل های فشارقوی برق استفاده می شود. این تحقیق در رابطه با امکان استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگ دانه در مخلوط RCCP انجام شده است. ضایعات XLPE به عنوان سنگ دانه با نسبت های حجمی مختلف جایگزین درشت دانه طبیعی مخلوط بتنی شده است. این جایگزینی با درصدهای حجمی ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ انجام شده است. در ادامه وزن مخصوص، مدت زمان تراکم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت خمشی برای درصدهای آزمایش و نمونه های شاهد اندازه گیری شده است. نتایج نشان داد استفاده از ضایعات XLPE ویژگی های بتن تازه و بتن سخت شده را تغییر می دهد. ضایعات XLPE سبب کاهش وزن مخصوص و مدت زمان تراکم می شود. نتایج آزمایش ها نشان داده است که جایگزینی ۵ درصد حجمی درشت دانه با ضایعات XLPE، سبب افزایش ۱۰ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۸ روزه ی RCCP شده است. علاوه بر این، مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه این مخلوط بتنی از حداقل مقاومت های فشاری و خمشی تعیین شده در آیین نامه روسازی بتن غلتکی بیشتر شده است. با توجه به نتایج

^۱ Roller Compacted concrete Pavement

^۲ Cross-linked polyethylene

آزمایش‌ها استفاده از ضایعات XLPE در درصدهای بیشتر از ۵ درصد حجمی درشت‌دانه در بتن غلتکی، برای مسیرهایی با ترافیک سبک، محوطه‌های صنعتی، مسیرهای فرعی و راه‌های روستایی و پیاده‌روها توصیه شده است. همچنین استفاده از ضایعات XLPE همواره سبب افزایش شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی RCCP شده است. درمجموع، استفاده از ضایعات XLPE در RCCP از وارد شدن این ضایعات به محیط‌زیست جلوگیری کرده و نیاز به سنگ‌دانه طبیعی را نیز کاهش می‌دهد و سبب کاهش هزینه محل‌های دفن زباله و ذخیره انرژی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پلی‌اتیلن کراس لینک، روسازی بتن غلتکی، ضایعات بازیافتی، ویژگی‌های مکانیکی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱: شمسایی. م، آقایان. ا، " بررسی آزمایشگاهی تاثیر ضایعات عایق کابل های قدرت بر مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی " چهارمین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی درمهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران ۷ و ۸ بهمن ماه ۱۳۹۵.

۲: شمسایی. م، آقایان. ا، " بررسی آزمایشگاهی تاثیر نوع سنگدانه بر مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی " چهارمین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی درمهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران ۷ و ۸ بهمن ماه ۱۳۹۵.

فهرست

فصل اول	۱
۱- کلیات	۲
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ضرورت انجام پژوهش	۴
۱-۳- مزایای این پژوهش	۷
۱-۴- فرضیات پژوهش	۷
۱-۵- سؤال‌های اصلی پژوهش	۸
۱-۶- جنبه‌های نوآوری پژوهش	۹
۱-۷- روش تحقیق	۹
۱-۸- ساختار پایان‌نامه	۱۰
فصل دوم	۱۱
۲- ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته	۱۲
۲-۱- تعریف و تاریخچه بتن غلتکی	۱۲
۲-۲- مزایای بتن غلتکی	۱۷
۲-۳- انواع روسازی‌های بتنی و جایگاه بتن غلتکی	۱۹
۲-۳-۱- روسازی بتنی غیرمسلح درزدار (JPCP)	۲۱

۲۲	 ۲-۳-۲- روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP)
۲۳	 ۳-۳-۲- روسازی بتنی مسلح پیوسته (CRCP)
۲۴	 ۴-۳-۲- روسازی بتنی پیش‌تنیده (PCP)
۲۵	 ۵-۳-۲- روسازی بتنی مسلح با الیاف
۲۵	 ۶-۳-۲- روسازی بتنی انعطاف‌پذیر
۲۶	 ۷-۳-۲- روسازی بتنی بلوکی
۲۷	 ۸-۳-۲- روسازی بتن غلتکی
۲۸	 ۴-۲- کاربردهای روسازی بتن غلتکی
۲۸	 ۵-۲- خواص مهندسی بتن غلتکی
۲۹	 ۱-۵-۲- مقاومت فشاری
۲۹	 ۲-۵-۲- مقاومت کششی غیرمستقیم (دونیم شدن)
۳۰	 ۳-۵-۲- مقاومت خمشی
۳۰	 ۴-۵-۲- کارایی
۳۱	 ۵-۵-۲- جرم حجمی و درجه تراکم
۳۲	 ۶-۵-۲- آب انداختگی
۳۲	 ۷-۵-۲- جداسازی
۳۲	 ۸-۵-۲- خستگی

۳۳	۹-۵-۲ دوام در برابر ذوب و انجماد
۳۴	۱۰-۵-۲ دوام در برابر سولفات‌ها
۳۴	۱۱-۵-۲ انقباض ناشی از خشک شدن
۳۵	۱۲-۵-۲ جذب آب
۳۵	۶-۲ عملکرد بتن غلتکی
۳۵	۱-۶-۲ انتقال بار از درزها
۳۶	۲-۶-۲ اتصال بین لایه‌ها (مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها)
۳۸	۳-۶-۲ مقاومت در برابر لغزش
۳۹	۴-۶-۲ مسطح بودن سطح یا همواری
۴۰	۵-۶-۲ کیفیت تردد
۴۱	۶-۶-۲ مقاومت در برابر سایش
۴۲	۷-۲ مصالح مصرفی در بتن غلتکی روسازی راه
۴۲	۱-۷-۲ مصالح اصلی
۴۴	۲-۷-۲ مواد و مصالح افزودنی
۴۷	۳-۷-۲ طرح اختلاط بتن غلتکی
۵۶	۸-۲ مصالح بازیافتی جایگزین سنگ‌دانه در روسازی بتنی معمولی و روسازی بتن غلتکی
۵۶	۱-۸-۲ خرده لاستیک

۵۸	 ۲-۸-۲- خرده بتن
۵۹	 ۳-۸-۲- خرده آسفالت بازیافتی (RAP)
۶۱	 ۴-۸-۲- سرباره کوره و ضایعات شیشه
۶۲	 ۵-۸-۲- مواد پلاستیکی (پلی اتیلن)
۶۵	 فصل سوم
۶۶	 ۳- مصالح مصرفی، طرح اختلاط و روش انجام آزمایش ها
۶۶	 ۱-۳- مواد و مصالح مصرفی
۶۶	 ۱-۱-۳- سنگ دانه ها
۷۴	 ۲-۱-۳- سیمان
۷۵	 ۳-۱-۳- آب
۷۵	 ۲-۳- آزمایش ها و روش های انجام
۷۵	 ۱-۲-۳- آماده سازی ضایعات عایق کابل های فشار قوی
۷۶	 ۲-۲-۳- تهیه مخلوط بتن غلتکی
۷۷	 ۳-۲-۳- تعیین طرح اختلاط ها
۷۸	 ۴-۲-۳- چگالی بتن و زمان تراکم برای درصدهای مختلف XLPE
۸۰	 ۵-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری و ساخت نمونه های آن
۸۱	 ۶-۲-۳- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و ساخت نمونه های آن

۸۲	۳-۲-۷- آزمایش مقاومت خمشی و ساخت نمونه‌های آن
۸۴	۳-۲-۸- عمل‌آوری نمونه‌ها
۸۷	فصل چهارم
۸۸	۴- نتایج آزمایش‌ها و بحث در آن
۸۸	۴-۱- مقدمه
۸۹	۴-۲- تأثیر XLPE بر ویژگی‌های بتن تازه
۹۱	۴-۳- تغییرات مقاومت فشاری
۹۵	۴-۴- تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم
۹۸	۴-۵- تغییرات مقاومت خمشی
۱۰۱	فصل پنجم
۱۰۲	۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۰۲	۵-۱- نتیجه‌گیری
۱۰۵	۵-۲- پیشنهادها
۱۰۷	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ پخش روسازی بتن غلتکی به وسیله فینیشر ۴
- شکل ۲-۱ محل نگهداری ضایعات XLPE ۵
- شکل ۱-۲ عملیات تراکم روسازی بتن غلتکی ۱۲
- شکل ۲-۲ طرح کلی یک روسازی بتنی متداول ۱۹
- شکل ۳-۲ نحوه توزیع تنش در یک روسازی آسفالتی و بتنی ۲۰
- شکل ۴-۲ مقطع تیپ روسازی بتنی غیر مسلح در زردار ۲۲
- شکل ۵-۲ مقطع تیپ روسازی بتنی مسلح در زردار ۲۳
- شکل ۶-۲ مقطع تیپ روسازی بتنی مسلح پیوسته ۲۴
- شکل ۷-۲ دو نمونه روسازی بتنی بلوکی ۲۷
- شکل ۸-۲ رابطه بین مقاومت فشاری بتن غلتکی و نسبت آب به مواد سیمانی، به ازای نسبت‌های مختلف پوزولان به سیمان ۵۲
- شکل ۱-۳ ضایعات XLPE در شکل و اندازه مورد استفاده ۶۷
- شکل ۲-۳ منحنی دانه‌بندی مورد استفاده ۶۷
- شکل ۳-۳ یک نمونه از ضایعات XLPE قبل از خرد شدن ۷۶
- شکل ۴-۳ اندازه‌گیری زمان تراکم و چگالی بتن ۷۹
- شکل ۵-۳ اسلامپ صفر مخلوط روسازی بتن غلتکی ۷۹
- شکل ۶-۳ ساخت نمونه‌های استوانه‌ای با سربار روی میز ویبره ۸۱
- شکل ۷-۳ محل قرارگیری نمونه در آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای ۸۳
- شکل ۸-۳ ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی تحت سربار و به‌وسیله میز ویبره ۸۴

- شکل ۳-۹ نحوه عمل‌آوری نمونه‌ها ۸۵
- شکل ۴-۱ رابطه میان افزایش درصد XLPE و میانگین کاهش چگالی بتن تازه ۹۰
- شکل ۴-۲ رابطه میان مقدار ضایعات XLPE و میانگین مدت‌زمان تراکم ۹۱
- شکل ۴-۳ نمونه‌های مقاومت فشاری قبل و بعد از آزمایش ۹۲
- شکل ۴-۴ تأثیر مقدار ضایعات XLPE بر میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها ۹۴
- شکل ۴-۵ رابطه‌ی بین چگالی بتن و میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها ۹۴
- شکل ۴-۶ نمونه‌های مقاومت کششی غیرمستقیم قبل از آزمایش ۹۵
- شکل ۴-۷ تأثیر مقدار ضایعات XLPE بر میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها ۹۶
- شکل ۴-۸ نمونه‌های مقاومت کششی غیرمستقیم بعد از آزمایش ۹۷
- شکل ۴-۹ تأثیر مقدار ضایعات XLPE بر میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها ۹۹
- شکل ۴-۱۰ مقایسه شکست نمونه‌های خمشی و اندازه ترک برای درصدهای مختلف آزمایش ۱۰۰

فهرست جداول:

جدول ۱-۲	فهرست و علامت‌های روابط طرح اختلاط	۵۱
جدول ۲-۲	درصد حجمی درشت‌دانه در واحد حجم بتن	۵۳
جدول ۱-۳	دانه‌بندی مورد استفاده	۶۸
جدول ۲-۳	نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ‌دانه‌ها و عایق کابل فشار قوی	۷۳
جدول ۳-۳	مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ II شاهرود	۷۴
جدول ۴-۳	مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II شاهرود	۷۵
جدول ۵-۳	مراحل اختلاط مصالح برای تهیه مخلوط بتن غلتکی	۷۶
جدول ۶-۳	طرح اختلاط‌های مورد استفاده و مقدار ضایعات عایق کابل قدرت	۷۷
جدول ۱-۴	مقاومت فشاری برای نمونه‌های شاهد و حاوی XLPE	۹۳
جدول ۲-۴	مقاومت کششی برای نمونه‌های شاهد و حاوی XLPE	۹۶
جدول ۳-۴	مقاومت خمشی برای نمونه‌های شاهد و حاوی XLPE	۹۸

فصل اول

کلیات

۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

امروزه نقش حمل و نقل در پیشرفت و توسعه‌ی کشورها انکارناپذیر است. سرعت گردش مالی یک کشور با میزان کیفیت و ایمنی راه‌های آن کشور ارتباط مستقیم دارد. در واقع شبکه حمل و نقل هر کشور شریان‌های حیاتی و از بزرگ‌ترین سرمایه‌های آن کشور است. مهم‌ترین اجزای شبکه حمل و نقل عبارت‌اند از: فرودگاه‌ها، راه آهن، پایانه‌های مسافری و باری، بندرها و راه‌ها. راه‌های زمینی نقش مهمی در کارایی شبکه دارند. از این میان می‌توان به احداث آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها اشاره کرد که اهمیت فراوانی دارند و این امر نیازمند بودجه و هزینه‌های زیادی است. بخش زیادی از درآمد سالیانه دولت‌ها و همچنین کشور ما صرف توسعه، ساخت و تعمیر و نگهداری راه‌ها می‌شود. در این بین بخش زیادی از این هزینه‌ها صرف رویه‌های راه می‌شود که عملکرد ضعیف آن باعث اتلاف سرمایه می‌شود. بنابراین روسازی راه از مهم‌ترین بخش‌های راهسازی است و علاوه بر جنبه اقتصادی، از جنبه‌های استقامت، دوام، کیفیت سواری و راحتی استفاده‌کنندگان حائز اهمیت است. رعایت استانداردها در زمان طراحی و ساخت روسازی تأثیر زیادی در تعمیر و نگهداری آن در طول عمر سرویس‌دهی دارد. زیرا روسازی باید با توجه به عواملی مانند بار وارده، شرایط آب و هوایی، مصالح منطقه طراحی و اجرا شود تا عمر سرویس‌دهی مناسب و هزینه‌های تعمیر نگهداری پایینی داشته باشد.

در حال حاضر اکثر رویه‌های راه‌ها در ایران از نوع آسفالتی (انعطاف‌پذیر) می‌باشند که مهم‌ترین دلیل این امر قیمت پایین قیر و منابع غنی نفت بوده است. علاوه بر این استفاده طولانی از این نوع روسازی و در نتیجه داشتن ماشین‌آلات مناسب و تجربه کافی برای اجرا یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر ارائه نشدن

گزینه جایگزین برای آن است. این در حالی است که احداث روسازی بتنی (صلب) در اکثر کشورهای توسعه یافته سابقه طولانی دارد. در سال های اخیر با توجه بالا رفتن قیمت نفت خام و محصولات آن مانند قیر، هزینه ساخت روسازی آسفالتی افزایش قابل توجهی داشته است. با توجه به معایب روسازی آسفالتی در محورهای پرترافیک که معمولاً دارای خرابی هایی از قبیل ناهمواری ها، ترک و اضمحلال زودهنگام و تغییر خواص با دما می باشند، استفاده از روسازی بتنی سبب رفع مشکلات ذکر شده و کاهش دوره تعمیرات می گردد. خرابی روبه های آسفالتی راه ها علاوه بر اینکه کیفیت عبور را کاهش می دهد، باعث خرابی سایر لایه های روسازی شده و منجر به افزایش خسارت می شود. البته برخی از این مشکلات به اجرای ضعیف این نوع روسازی مربوط بوده است و بخش دیگر نیز به نبود تولید قیر مناسب ارتباط دارد. روند رشد کارخانه های تولید سیمان در کشور ما باعث شده است که استفاده از روسازی بتنی گزینه ای مناسبی برای پروژه های راه سازی باشد.

خواص روسازی های بتنی به دما بستگی ندارد و تغییر شکل های دائمی مانند روسازی های آسفالتی در آن رخ نمی دهد. از مزایای دیگر روسازی بتنی که سبب برتری آن نسبت به روسازی آسفالتی شده است، هزینه های کمتر تعمیر و نگهداری آن است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸). روسازی بتنی دارای انواع مختلفی است که از جمله آن می توان به روسازی های بدون داول بار^۱، روسازی های بتنی مسلح، روسازی های بتنی غیرمسلح با داول بار، روسازی های بتنی پیش تنیده، روسازی های بتنی مسلح پیوسته، روسازی های بتنی متخلخل و روسازی های بتن غلتکی اشاره کرد.

جایگزین ایده آل روسازی های آسفالتی، استفاده از روسازی های بتنی است. در کشور ما مشکل اصلی اکثر روسازی های بتنی کمبود ماشین آلات خاص و امکانات اجرایی است. ولی روش جدیدی از

^۱ Dowel Bar

روسازی‌های بتنی به نام روسازی بتن غلتکی^۱ که مدتی است در راهسازی رایج شده است، با ماشین‌آلات متداول روسازی آسفالتی قابل اجرا است (ACI 325.10R, 2001). در شکل ۱-۱ اجرای این روسازی با فینیشر نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ پخش روسازی بتن غلتکی به وسیله فینیشر

۱-۲- ضرورت انجام پژوهش

امروزه با توسعه‌ی صنایع، نرخ تولید ضایعات آن‌ها افزایش یافته است. یکی از این ضایعات مربوط به پلی‌اتیلن کراس لینک^۲ یا به اختصار XLPE است. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مورد بررسی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، بحث آلودگی‌های محیط‌زیست است. پلی‌اتیلن کراس لینک نوعی عایق مناسب برای کابل‌های فشارقوی است. بیش از ۵۰ سال است که XLPE به عنوان عایق مناسب برای کابل‌های فشارقوی استفاده می‌شود. در ایران و سرتاسر جهان سالانه مقادیر زیادی از کابل‌های فشارقوی با این عایق تولید می‌شود که خود دارای ضایعاتی است که اگر در طبیعت رها گردد، سبب ایجاد آلودگی

^۱ Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)

^۲ Cross-Linked Polyethylene (XLPE)

در محیط زیست می شود. همچنین این مواد در طبیعت تقریباً تجزیه ناپذیر می باشند. در تحقیقی که سال ۲۰۰۳ توسط تکودا و همکاران^۱ انجام شد مقدار تولید سالانه ضایعات XLPE ۱۰۰۰۰ تن برآورد شده است. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۰۷ توسط کریستین^۲ در سوئد انجام شده است مقدار ضایعات کابل های برق را ۴۰۰۰۰ تن برآورد کرده اند. در شکل ۱-۲ دو محل نگهداری این ضایعات نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ محل نگهداری ضایعات XLPE

انباشته شدن ضایعات پلیمرها شامل ضایعات پلاستیک، ضایعات لاستیک و مواد پلی اتیلنی مانند XLPE، باعث نگرانی در سرتاسر دنیا شده است. در حال حاضر این مواد را یا با روش های خاص دفن می کنند یا به عنوان سوخت سوزانده می شوند. چون XLPE روانی^۳ پایینی دارد، به ندرت بازیافت می شود

^۱ Tokuda et al.

^۲ Christéen

^۳ fluidity

و بازیافت آن برای محققین از اهمیت بالایی برخوردار است. به ناچار اکثر ضایعات XLPE سوزانده یا دفن می‌شود. اما سوختن و خاکستر کردن این ضایعات باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شود. همچنین دفن کردن نیز به محل مناسب نیاز دارد و سبب آلودگی خاک نیز می‌گردد. به همین دلایل یافتن راهی مناسب برای بازیافت XLPE دارای اهمیت زیادی است و سبب استفاده مجدد از این ماده با ارزش می‌گردد (شانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۰؛ لو و همکاران^۲، ۲۰۰۹).

بنابراین یکی از موارد مصرف ضایعات XLPE می‌تواند جایگزین کردن آن‌ها با سنگ‌دانه‌های طبیعی در مخلوط روسازی بتن غلتکی باشد. با توجه به مزایای بسیاری که روسازی بتن غلتکی نسبت به روسازی بتنی معمولی دارد که در بخش‌های بعد به آن اشاره خواهد شد، ضروری است که تحقیقات بیشتری روی این نوع روسازی بتنی انجام شود. علاوه بر فواید ذکرشده، استفاده از این ضایعات به‌عنوان سنگ‌دانه باعث کاهش مصرف سنگ‌دانه طبیعی شده که از لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی حائز اهمیت است.

یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر استفاده از ضایعات پلی‌اتیلن کراس لینک بر مقاومت کششی و شکل‌پذیری مخلوط بتن غلتکی است. به دلیل جذب آب صفر درصدی این ضایعات، استفاده از آن‌ها به عنوان سنگ‌دانه، باعث کاهش نیاز به آب و سهولت اجرا می‌گردد. پس استفاده از ضایعات XLPE در روسازی بتن غلتکی توجیه فنی بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی دارد. از دیگر اهداف مهم این تحقیق تعیین درصد مناسب این ضایعات برای ارائه‌ی یک طرح اختلاط متعادل از نظر خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری برای روسازی بتن غلتکی است.

^۱ Shang et al.

^۲ Lu et al.

۳-۱- مزایای این پژوهش

مزایای اصلی این پژوهش را می‌توان در سه مورد توضیح داد:

الف) جنبه‌های اقتصادی:

با توجه به اینکه ضایعات XLPE در اغلب موارد رایگان و تقریباً غیرقابل بازیافت هستند، هزینه کمتری (فقط هزینه خرد کردن) را نسبت به سنگ‌دانه معمولی دارند. بنابراین با استفاده از آن‌ها با هزینه کمتر، مصالح ساخت روسازی تأمین می‌گردد.

ب) جنبه‌های زیست‌محیطی:

با توجه به اینکه هنوز راه مناسبی برای بازیافت این ضایعات ارائه نشده است، روش‌های موجود بازیافت که شامل سوزاندن و دفن کردن آن‌ها در خاک است، سبب آلودگی هوا و خاک می‌شود. در نتیجه استفاده از این ضایعات به عنوان سنگ‌دانه در روسازی بتن غلتکی، برای محیط‌زیست سودمند است.

ج) جنبه‌های فنی: با توجه به ویژگی‌های ضایعات XLPE، به نظر می‌رسد این ماده بازیافتی بتواند برخی خواص روسازی بتن غلتکی از جمله مقاومت کششی و شکل‌پذیری (جذب انرژی) را بهبود بخشد و از لحاظ فنی مفید باشد.

۴-۱- فرضیات پژوهش

با توجه به خاصیت ارتجاعی بیشتر، چگالی و جذب آب کمتر ضایعات XLPE در مقایسه با سنگ‌دانه طبیعی، انتظار می‌رود که با جایگزینی این مواد با سنگ‌دانه طبیعی در درصدهای مورد نظر، برخی از خواص روسازی بتن غلتکی بهبود پیدا کرده و در عین حال اثرات این کار اثرات مطلوب زیست‌محیطی را

در پی خواهد داشت.

۱-۵- سؤال‌های اصلی پژوهش

هدف اصلی این پژوهش ارائه‌ی مخلوط بتنی سازگار با محیط‌زیست و دارای ویژگی‌های مکانیکی مطلوب متناسب با آیین‌نامه و مناسب برای کاربردهای مختلف حمل و نقل است. در این تحقیق آزمایشگاهی به سؤالات زیر پاسخ داده می‌شود:

(۱) آیا می‌توان از ضایعات پلی‌اتیلن کراس لینک به عنوان سنگ‌دانه در مخلوط روسازی بتن غلتکی استفاده کرد؟

(۲) تأثیر استفاده از ضایعات XLPE در درصدهای مختلف ۰، ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی روسازی بتن غلتکی چگونه است؟

(۳) آیا استفاده از ضایعات XLPE می‌تواند بر قابلیت جذب انرژی روسازی بتن غلتکی تأثیر مثبت بگذارد؟

(۴) بعد از جایگزینی این ضایعات چگالی و زمان تراکم بتن غلتکی چه تغییری می‌کند؟

(۵) در صورت امکان استفاده از ضایعات XLPE در روسازی بتن غلتکی حداکثر چند درصد حجمی از آن نسبت به کل مصالح سنگ‌دانه‌ای مجاز است؟

(۶) تأثیر این ضایعات بر روند کسب مقاومت‌های مورد آزمایش در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری چگونه است؟

(۷) در کدام درصد جایگزینی روسازی بتن غلتکی بهترین ویژگی‌های مکانیکی و رفتار شکل‌پذیرتری دارد؟

۸) آیا استفاده از این ضایعات به عنوان سنگدانه در روسازی بتن غلتکی راه حل مناسبی برای بازیافت آنها است؟

۱-۶- جنبه‌های نوآوری پژوهش

با توجه به تحقیقات و مروری بر کارهای انجام شده، هنوز راه حلی مناسب با هزینه پایین برای بازیافت ضایعات XLPE انجام نشده است. به نظر می‌رسد با استفاده از این ضایعات در روسازی بتن غلتکی، علاوه بر بازیافت این مصالح، بتوان برخی از ویژگی‌های روسازی بتن غلتکی را بهبود داد. در این تحقیق ضایعات XLPE در مقادیر ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد حجمی با سنگدانه طبیعی در مخلوط روسازی بتن غلتکی جایگزین شده است. در نهایت به بررسی تغییرات ویژگی‌های مکانیکی، چگالی بتن، مدت زمان تراکم و شکل‌پذیری برای درصدهای آزمایش پرداخته شده است. در نهایت مقایسه هر یک از این پارامترها در درصدهای آزمایش با نمونه‌های شاهد صورت گرفته است.

۱-۷- روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا ضایعات XLPE به اندازه مورد نظر خرد شده است سپس جایگزینی با درصدهای آزمایش انجام شده است. ۵ طرح اختلاط مختلف شامل ۰، ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد حجمی از این ضایعات ساخته شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم و خمشی بر روی نمونه‌ها انجام شده است و برای هر یک از این آزمایش‌ها ۴۵ نمونه ساخته شده است. چگالی و مدت زمان تراکم برای درصدهای آزمایش نیز محاسبه شده است. در نهایت به مقایسه و ارزیابی نتایج به دست آمده پرداخته شده است.

۱-۸- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تهیه و تنظیم شده است که به شرح زیر است:

- در فصل اول، کلیات پژوهش و شناخت کلی از بتن غلتکی، اهمیت استفاده از آن و همچنین ضرورت و هدف انجام این پژوهش به صورت مختصر بیان شده است.
- در فصل دوم، مطالبی در ارتباط با خصوصیات و مشخصات روسازی بتن غلتکی، خلاصه‌ای از کارهای انجام شده قبلی در زمینه‌ی استفاده از مواد بازیافتی در روسازی بتنی معمولی و روسازی بتن غلتکی مطرح شده است.
- در فصل سوم، خصوصیات مصالح مصرفی، آزمایش‌ها و روش انجام آن‌ها و طرح اختلاط‌های مورد استفاده توضیح داده شده است.
- در فصل چهارم، بررسی و مقایسه اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها و تشریح نتایج حاصل از آزمایش‌ها مطرح شده است.
- فصل پنجم، به نتیجه‌گیری کلی از آزمایش‌ها و همچنین پیشنهادهایی در رابطه با ادامه تحقیق اختصاص داده شده است.

فصل دوم

ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته

۲- ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- تعریف و تاریخچه بتن غلتکی

بتن غلتکی معمولاً در دو زمینه کاری سدسازی و روسازی راه استفاده می‌گردد. زمانی که از بتن غلتکی برای ساخت سد استفاده می‌شود، مخلوط بتنی دارای سیمان و مقاومت فشاری کمتری است. این در حالی است که مخلوط بتن غلتکی روسازی، دارای مقدار سیمان بیشتر و مقاومت فشاری بالاتر از ۲۷/۶ مگاپاسکال است. بنابراین می‌توان از آن به عنوان رویه اصلی سازه روسازی استفاده کرد. بتن غلتکی روسازی به مخلوط نسبتاً سفت و خشکی از سنگ‌دانه‌ها (حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر)، مواد سیمانی و آب که توسط غلتک‌های لرزه‌ای متراکم می‌گردند، گفته می‌شود. این مخلوط غیر همگن شبیه به شن مرطوب و یا بتن با اسلامپ صفر به دست می‌آید. بتن غلتکی معمولاً در لایه‌هایی به ضخامت کوبیده شده حداکثر ۲۵۴ میلی‌متر اجرا می‌گردد. این لایه‌ها توسط غلتک‌های لرزه‌ای چرخ فلزی متراکم می‌شوند و گاهی در پایان از غلتک‌های چرخ لاستیکی نیز استفاده می‌گردد. در شکل ۱-۲ روش تراکم با غلتک نشان داده شده است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).



شکل ۱-۲ عملیات تراکم روسازی بتن غلتکی

عمل‌آوری رویه‌های بتن غلتکی توسط آب و یا مواد دیگر به منظور دستیابی به سطحی سخت و پایا انجام می‌پذیرد. رویه بتن غلتکی معمولاً برای تحمل بار مستقیم ترافیک طراحی می‌شود و عموماً از لایه‌های نهایی سطحی مجزایی استفاده نمی‌گردد، ولی برای تسطیح و تعمیرات می‌توان از یک لایه مخلوط آسفالت گرم روی سطح نهایی استفاده کرد. همچنین معمولاً درزهای عرضی و طولی در رویه بتن غلتکی اجرا نمی‌شوند. با توجه به اینکه رسیدن به سطحی صاف در رویه بتن غلتکی بخصوص در سال‌های آغاز استفاده از آن دشوار بوده است، کاربرد آن معمولاً جهت مسیرهایی با سرعت پایین بوده است. ولی امروزه با ساخت فینیش‌های اصلاح شده و قدرت تراکم بیشتر، امکان استفاده از این نوع روسازی برای سرعت‌های بالاتر نیز فراهم شده است.

اولین رویه بتن غلتکی در آمریکای شمالی توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا^۱ انجام شده است. پروژه مذکور باند فرودگاه یاکیم^۲ در واشنگتن بود که در حوالی سال ۱۹۴۲ اجرا شده بود. البته اجرای نوعی از رویه بتن غلتکی در دهه ۱۹۳۰ در سوئد نیز گزارش شده است. اولین رویه بتن غلتکی در کانادا در سال ۱۹۷۶ در محوطه نگهداری الوارهای چوب در ونکوور اجرا شده است. دلیل استفاده از بتن غلتکی در این پروژه، ضخامت زیاد طراحی اولیه پروژه بوده است. ضخامت لایه ابتدا ۳۵۶ میلی‌متر اساس تثبیت شده با سیمان و سپس بر روی آن ۵۱ میلی‌متر رویه آسفالتی طراحی شده بود. به عنوان جایگزین رویه آسفالتی، مالک پروژه تصمیم به افزایش مقدار سیمان در لایه فوقانی برای رسیدن به افزایش مقاومت سطحی و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد روسازی گرفت. بنابراین مقدار سیمان در ۱۵۲ میلی‌متر فوقانی به ۱۳ درصد وزنی و در ۲۰۳ میلی‌متر تحتانی به میزان ۸ درصد وزنی استفاده شد. مساحت پروژه در حدود ۱/۶ هکتار بوده است و از هیچ گونه ملات بین لایه‌ها استفاده نشده بود. بعد از چند سال

^۱ United States Army Corps of Engineers

^۲ Yakima Air Terminal

بهره‌برداری، جداشدگی و پوسته شدن جزئی در قسمت‌هایی از سطح مشاهده گردید. این محوطه از سال ۱۹۷۶ تاکنون در حال بهره‌برداری است. همچنین مساحت محوطه در سال ۱۹۷۸ به ۳/۶ هکتار افزایش پیدا کرد و در سال ۱۹۸۷ یک لایه نازک آسفالت به منظور افزایش عمر مفید و بهبود سطح پروژه، روی بتن غلتکی اجرا شد (ACI 325.10R, 2001).

با توجه به موفقیت رویه بتن غلتکی در پروژه مذکور، سه پروژه دیگر محوطه‌سازی کارخانه‌های تولید الوار در جزیره کویین شارلوت در ایالت بریتیش کلمبیا بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۱۹۷۸ انجام شد. این سه پروژه نیز با حداقل هزینه‌ی نگهداری تا امروز در حال بهره‌برداری می‌باشند. تا سال ۱۹۸۰ در حدود ۸ هکتار محوطه نگهداری الوار در ایالت بریتیش کلمبیا^۱ ساخته شد. پروژه‌ی دیگری که باعث گسترش رویه بتن غلتکی در کانادا شد، اجرای جاده دسترسی معدن زغال‌سنگ به طول ۱۹/۳ کیلومتر به ضخامت ۱۷۹ میلی‌متر بتن غلتکی در تامبلر ریج^۲ در ایالت بریتیش کلمبیا است. همچنین در کنار پروژه، محوطه نگهداری زغال‌سنگ به مساحت ۱/۶ هکتار با ضخامت ۲۲۹ میلی‌متر رویه بتن غلتکی ساخته شد. روی جاده دسترسی، یک لایه بتن آسفالتی اجرا شده ولی محوطه انبار بدون هیچ گونه لایه رویی باقی ماند. این منطقه دارای شرایط آب و هوایی سخت زمستانی با عمق یخ‌زدگی ۲/۴ متر بود. تا امروز هیچ گونه خرابی ناشی از شرایط بد آب و هوایی در پروژه مشاهده نشده است، اما در مسیر حرکت ماشین‌آلات حمل در طول جاده، خرابی‌هایی مشاهده شده است (ACI325.10R, 2001).

هم زمان با گسترش استفاده از رویه بتن غلتکی در کانادا، سازمان‌های مختلفی در آمریکا با توجه به تجربه استفاده از بتن غلتکی در سدسازی به این موضوع علاقه‌مند شدند. در اوایل دهه ۸۰ میلادی، گروه مهندسين ارتش آمریکا مطالعه روی استفاده از رویه بتن غلتکی در مراکز نظامی را آغاز کردند. یک جاده

^۱ British Columbia

^۲ Tumbler Ridge

عبور کامیون‌های نظامی به صورت آزمایشی با ضخامت ۲۲۹ میلی‌متر تا ۳۳۰ میلی‌متر رویه بتن غلتکی و به مساحت کلی ۳۹۲ مترمربع در پادگان استوارت در سال ۱۹۸۳ و یک جاده عبور تانک‌ها با ضخامت ۲۵۴ تا ۳۳۰ میلی‌متر به مساحت ۴۹۳ مترمربع در پادگان جورجیا ساخته شد. همچنین در سال ۱۹۸۴، ۱۵۶۴ مترمربع رویه بتن غلتکی به ضخامت ۲۱۶ میلی‌متر برای محوطه امتحان تانک‌ها در پادگان لوییسی واشنگتن ساخته شد (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

در سال ۱۹۸۴، موضوع پایایی RCCP در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد مطرح شد. گروه مهندسين ارتش آمریکا، رویه آزمایشی در مقیاس واقعی در آزمایشگاه، تحقیق در خصوص مکان‌های سرد در هانوور نیوهمپشایر^۱ را ساختند. نتیجه آزمایش موفقیت‌آمیز بود و یادداشتی به تمامی دفاتر مهندسی به تاریخ ۲۵ ژانویه ۱۹۸۵ با این مضمون ارسال شد که استفاده از RCCP برای سطوح افقی توصیه می‌گردد (ACI325.10R, 2001).

اولین پروژه واقعی طراحی و اجرا شده توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا، یک محوطه نظامی به مساحت ۱۵۱۷۵ مترمربع در پادگان هود در تگزاس بود. ضخامت رویه اجرا شده، ۲۵۴ میلی‌متر و مقاومت خمشی آن، ۵/۵ مگاپاسکال بود. این پروژه اطلاعات مهمی را در خصوص حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها، روش‌های اجرای یک لایه‌ای و چند لایه‌ای بتن غلتکی، روند تراکم، عمل‌آوری و نحوه نمونه‌برداری از رویه بتن غلتکی در اختیار قرار داد. در سال ۱۹۸۶ محوطه ماشین‌های چرخ زنجیری در پادگان لوییسی واشنگتن ساخته شد. مساحت محوطه ۲۱۷۵۳ مترمربع و ضخامت رویه ۲۱۶ میلی‌متر بود. علاقه به رویه‌های بتن غلتکی با مقاومت زیاد با گسترش صنایع معدنی و چوب در اواسط دهه ۸۰ میلادی افزایش یافت. اداره راه‌آهن بورلینگتون^۲ شمالی از RCCP برای اجرای محوطه‌ای به مساحت ۴۴۳۱۳ مترمربع در

^۱ New Hampshire

^۲ Burlington

هوستون^۱ تگزاس در سال ۱۹۸۵ و ۱۰۷۰۲۱ مترمربع در دنور^۲ کولورادو در سال ۱۹۸۶ استفاده کرد. در سال ۱۹۸۵ بندر تاکوما واشنگتن از RCCP در مساحتی برابر ۶/۹ هکتار استفاده گردید. همچنین مساحت زیادی از ترمینال‌های دریایی کانلی و موران در بوستون^۳ بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۸۸ از RCCP ساخته شد (ACI325.10R, 2001).

بزرگ‌ترین پروژه‌های رویه بتن غلتکی در سال‌های ۱۹۸۸ تا ۱۹۸۹ ساخته شده‌اند که یکی شامل ۵۴۳۴۶۴ مترمربع رویه به ضخامت ۲۰۳ تا ۲۵۴ میلی‌متر در کارخانه جنرال موتورز ساترن^۴ در اسپیرینگ هایل تنسی و دیگری محوطه پادگان درام نیویورک به مساحت ۳۶ هکتار و ضخامت ۲۵۴ میلی‌متر است. به جز گزارش مربوط به اجرای رویه بتن غلتکی در یاکیما واشنگتن در سال ۱۹۴۲، تنها فرودگاه دیگری که از رویه بتن غلتکی استفاده کرده است، فرودگاه بین‌المللی پرتلند در سال ۱۹۸۵ است. در این پروژه محل موقت نگهداری هواپیما به مساحت ۳/۶ هکتار و ضخامت ۳۵۶ میلی‌متر توسط رویه بتن غلتکی اجرا شده است (ACI325.10R, 2001).

بعد از پیشرفت‌های RCCP، کشورهای دیگری نیز از این نوع روسازی استفاده کردند. در اندونزی اولین روسازی بتن غلتکی در سال ۱۹۸۵ ساخته شد و علی‌رغم رضایت‌بخش نبودن اولین تجربه آن‌ها تا سال ۱۹۹۰ بیش از ۵۵۰۰۰۰ مترمربع از این نوع روسازی در آن کشور ساخته شد. در ژاپن اولین روسازی بتن غلتکی در سال ۱۹۸۷ به بهره‌برداری رسید و تا سال ۱۹۹۷ حدود ۱۸۰۰۰۰۰ مترمربع روسازی بتن غلتکی در این کشور ساخته شده است. در مالزی نیز اولین روسازی بتن غلتکی در سال ۱۹۹۰ برای یک جاده ایالتی و به صورت آزمایشی ساخته شد (داورنیا، ۱۳۸۲).

^۱ Houston

^۲ Denver

^۳ Boston

^۴ General Motors Saturn

علاوه بر کشورهای ذکر شده، کشورهای نروژ، دانمارک، فنلاند، فرانسه، آرژانتین، استرالیا و آلمان بعد از سال ۱۹۸۰ از روسازی بتن غلتکی استفاده کردند که مساحت هریک حدود ۱۰۰۰۰۰ مترمربع بوده است. در کشورهای آفریقای جنوبی، ایسلند، شیلی، مکزیک، کلمبیا، اروگوئه و اکوادور از رویه‌های بتن غلتکی به صورت محدود و یا به صورت آزمایشی استفاده شده است. تا پایان سال ۱۹۹۰ مساحت کل بتن غلتکی در سراسر دنیا بیشتر از ۱۲۰۰۰۰۰۰ مترمربع شد که بیش از نصف آن در اسپانیا ساخته شده است. تقریباً ۱۵۰۰۰۰۰ مترمربع از این سطح برای بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی استفاده شده است. به طور کلی در اجرای این راه‌ها معمولاً یک لایه آسفالت در بالای لایه بتن غلتکی جهت بهبود کیفیت سطح راه و به کار رفته است. تقریباً حدود ۱۰۵۰۰۰۰۰ مترمربع نیز در مسیرهای با سرعت کم مانند راه‌های درجه دو و نواحی صنعتی و نظامی بدون روکش آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است (PIARC^۱, 1993). امروزه توجه خاصی به استفاده از RCCP در جاده‌های با ترافیک کم و یا متوسط و اتوبان‌های درجه دو شده است. در این راستا، علاوه بر موارد ذکر شده راه‌های شهری ایالت‌های پرتلند، اورگن، رجینا، ساسکاچوان، مکنزی و بریتیش کلمبیا توسط RCCP اجرا شده‌اند (ACI325.10R, 2001).

۲-۲- مزایای بتن غلتکی

این رویه‌ی بتنی یک فناوری در حال رشد و توسعه محسوب می‌شود و کشورهای مختلف دنیا در حال انجام کارهای تحقیقاتی جهت تکامل آن می‌باشند. در RCCP کارایی^۲ مخلوط بسیار مهم است و روی میزان تراکم آن تأثیر دارد. زمانی که بتن غلتکی سخت می‌شود از بسیاری جهات مشابه بتن معمولی است و فاکتورهایی مانند نسبت آب به سیمان (W/C) و میزان تراکم تأثیر مشابه روی بتن غلتکی دارند. میزان تراکم از اهمیت بالایی برخوردار است بنابراین درصد رطوبت مخلوط از دیدگاه ژئوتکنیکی باید نزدیک به

^۱ Permanent International Association of Road Congresses

^۲ Workability

درصد رطوبت بهینه باشد تا منجر به تراکم حداکثر و در نتیجه مقاومت بیشتر گردد (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸)

از مزایای مهم بتن غلتکی نسبت به روسازی بتنی معمولی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- به تجهیزات ساخت مخصوص نیازی ندارد و با ماشین‌آلات رایج روسازی آسفالتی (فینیشر اصلاح شده و غلتک) قابل اجرا است.
- سرعت اجرای آن بالاتر است و از لحاظ زمانی مطلوب است.
- اجرای آن هزینه کمتری دارد (با توجه به نداشتن آرماتور فولادی).
- ظرفیت حمل بار بالایی دارد و برای عبور و مرور ماشین‌آلات سنگین مناسب است.
- به حداقل تعمیر و نگهداری نیاز دارد.
- چون نسبت آب به سیمان پایینی دارد، حساسیت کمتری در برابر ترک خوردن وجود دارد.
- در صورت رعایت مسائل طراحی و اجرا مقاومت فشاری و دوام بالایی دارد.
- مشکلات آب انداختگی در روسازی بتنی معمولی از مسائلی است که باید کنترل شود ولی در رویه‌های بتن غلتکی چون آب اختلاط مخلوط بتنی کم است پدیده آب انداختگی اتفاق نمی‌افتد.

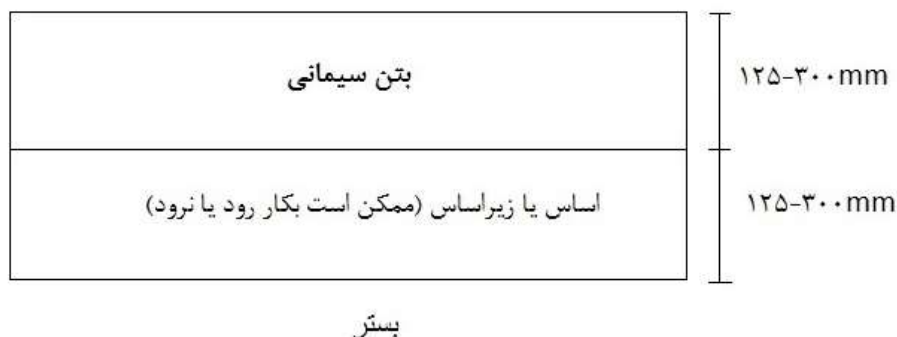
از مهم‌ترین معایب این روسازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هموار کردن این نوع روسازی خیلی مشکل است (برای حل مشکل از روکش آسفالتی استفاده می‌شود)
- عدم امکان داول گذاری و بنابراین انتقال بار در درزها اتفاق نمی‌افتد و شکل‌پذیری کمتر دارد.
- مطمئن شدن از یکنواختی و پایداری کیفی روسازی مشکل است.

- مقاومت لغزشی پایینی دارد و جهت افزایش مقاومت لغزشی از روش‌هایی مانند جاروکشی سطح که در روسازی بتنی معمولی نیز کاربرد دارد، استفاده می‌شود (حسنی، ۱۳۹۲)

۲-۳- انواع روسازی‌های بتنی و جایگاه بتن غلتکی

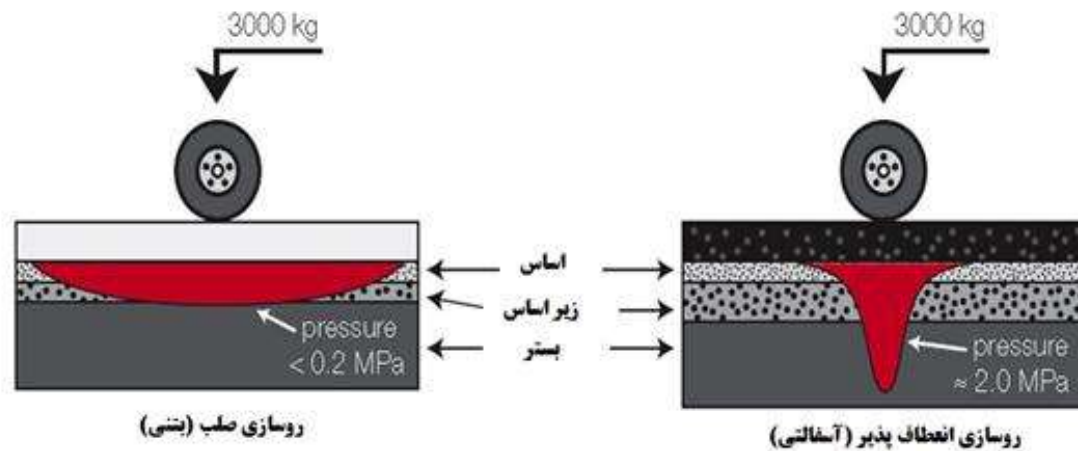
برای طراحی روسازی بتنی بجای تئوری لایه‌ها که در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود، از تئوری صفحات استفاده می‌گردد. در این تئوری فرض می‌شود دال بتنی یک صفحه تقریباً ضخیم است که قبل از خمش وارده به آن مسطح بوده و پس از خمش نیز به حالت مسطح باقی خواهد ماند. در شکل ۲-۲ یک روسازی بتنی متداول را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲ طرح کلی یک روسازی بتنی متداول

در زیر دال بتنی می‌تواند اساس و یا زیراساس قرار گیرد و یا اینکه دال بتنی به صورت مستقیم روی بستر قرار بگیرد. علت آن به نحوه توزیع تنش در روسازی‌های بتنی ارتباط پیدا می‌کند (کریمی، ۱۳۸۹). در شکل ۲-۳ نحوه توزیع تنش در یک روسازی آسفالتی و بتنی نشان داده شده است. به دلیل مقاومت زیاد روسازی بتنی در زمان اعمال بار، توزیع تنش در سطح بیشتر و شدت کمتری نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر صورت می‌گیرد؛ بنابراین روسازی بتنی نسبت به روسازی آسفالتی نیاز کمتری به لایه اساس

و زیراساس با توان باربری بالا دارد.



شکل ۲-۳ نحوه توزیع تنش در یک روسازی آسفالتی و بتنی

مهم‌ترین انواع روسازی‌های بتنی عبارت‌اند از:

- روسازی بتنی غیرمسلح درزدار^۱
- روسازی بتنی مسلح درزدار^۲
- روسازی بتنی مسلح پیوسته^۳
- روسازی بتنی پیش‌تنیده^۴
- روسازی بتنی مسلح با الیاف
- روسازی بتنی انعطاف‌پذیر
- روسازی بتنی بلوکی
- روسازی بتن غلتکی

^۱ Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

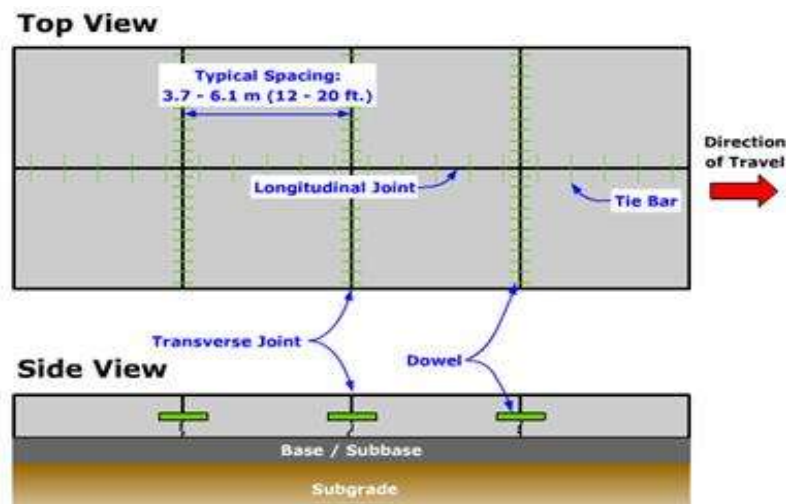
^۲ Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)

^۳ Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

^۴ Prestressed Concrete Pavement (PCP)

۲-۳-۱- روسازی بتنی غیر مسلح در زردار (JPCP)

حداکثر تنش در دال‌های بتنی در قسمت‌های لبه‌ی آن‌ها و در محل درزها در هنگام انتقال بار چرخ از دالی به دال دیگر رخ می‌دهد. در این حالت ضمن تغییر مکان قائم و نامساوی دال‌ها، تمرکز تنش تا حد زیادی در این موقعیت‌ها افزایش یافته و موجب ترک خوردن دال در این قسمت‌ها می‌شود. در روسازی بتنی غیرمسلح در زردار باید درزهای انقباض نزدیک به هم ساخته شوند. انتقال بار چرخ در هنگام عبور وسایل نقلیه از دالی به دال دیگر با استفاده از میلگردهای اتصال^۳ مستقر در دال بتنی امکان‌پذیر است. کاربرد استفاده یا عدم استفاده از میلگردهای اتصال با توجه به مناطق جغرافیایی مختلف با هم متفاوت است و عموماً زمانی که فاصله درزها بیش از ۴/۵ متر است مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نوع سنگ‌دانه، آب و هوا و تجربیات قبل، فاصله بین درزها ۳/۷ تا ۶/۱ متر استفاده می‌شود. اگر فاصله درزها زیاد شود، قفل و بست سنگ‌دانه‌ای کاهش یافته و امکان پدید آمدن ترک افزایش می‌یابد. از مزایای استفاده از میلگرد اتصال می‌توان به کاهش تنش‌های تابیدگی، کاهش تنش‌ها در لبه و گوشه، کاهش خرابی‌های ناشی از پلکانی شدن، شکستگی گوشه و مکندگی و کاهش آسیب‌دیدگی ناشی از آب‌بندی درزها، افزایش دوام و مقاومت روسازی و کاهش ضخامت روسازی و در نتیجه صرفه اقتصادی را نام برد (حسنی، ۱۳۹۲). در شکل ۲-۴ این نوع روسازی بتنی نشان داده شده است.

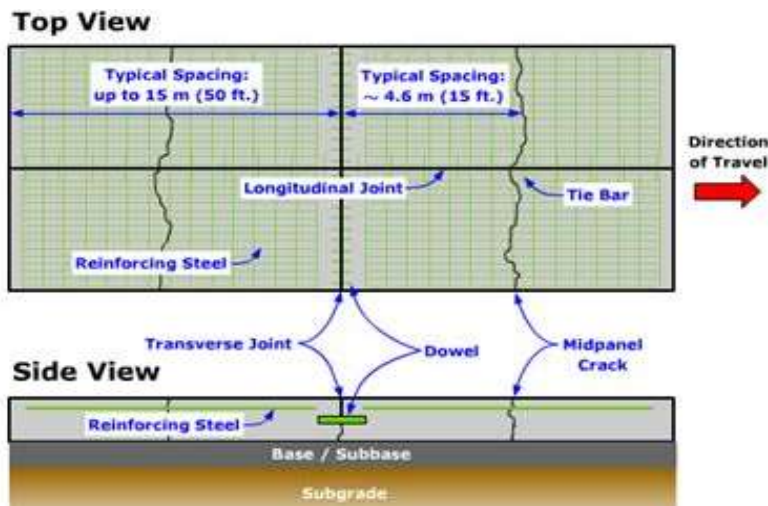


شکل ۲-۴ مقطع تیپ روسازی بتنی غیرمسلح درزدار

۲-۳-۲- روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP)

با توجه به مشکلات روسازی‌های بتنی غیرمسلح در ارتباط با ترک‌خوردگی‌های ناشی از تنش‌های کششی به لحاظ عبور بار ترافیکی، تغییرات دما و اصطکاک حاصل از تماس لایه رویه و لایه زیرین که موجب خرابی زودرس روسازی می‌گردد، راه حل مسلح کردن دال‌های بتنی انجام شد. در این نوع روسازی بتنی میلگردهای آجدار برای افزایش فاصله درزها تعبیه شده‌اند، بنابراین فواصل درزها از ۹ تا ۳۰ متر متغیر است. از مزایای این دال‌ها می‌توان به کاهش ضخامت مورد نیاز روسازی و در نتیجه تنش‌های حرارتی کمتر، افزایش دوام و طول عمر روسازی اشاره کرد. مهم‌ترین معایب نیز شامل مشکلات اجرایی و هزینه میلگرد می‌باشند (حسنی، ۱۳۹۲؛ هوانگ^۱، ۲۰۰۴). در شکل ۲-۵ این روسازی نشان داده شده است.

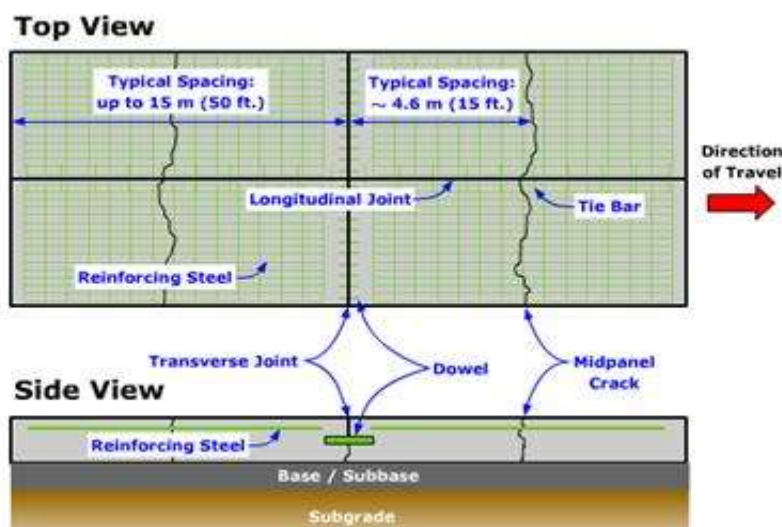
^۱ Huang



شکل ۲-۵ مقطع تیپ روسازی بتنی مسلح درزدار

۲-۳-۳- روسازی بتنی مسلح پیوسته (CRCP)

پیشرفت‌های تکنولوژی و تحقیقاتی در تشخیص و تعیین نقاط ضعف روسازی‌های اجرا شده نشان می‌دهد که با حذف درزها و مسلح نمودن دال‌های روسازی در هر دو جهت طولی و عرضی می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت. در واقع حذف درزها منجر به کاهش ضخامت مورد نیاز می‌شود. ضخامت این نوع روسازی بسته به شرایط طرح از ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر است و تقریباً ۷۰ تا ۸۰ درصد ضخامت روسازی معمولی است. از مزایای این نوع روسازی می‌توان به کاهش مشکلات مربوط به درزها و لبه‌ها از قبیل آسیب‌دیدگی آب‌بند درز به لحاظ پلکانی شدن، خرابی‌های گوشه، پدیده‌ی مکندگی، پکیدگی و دیگر خرابی‌های لبه درزها اشاره کرد. مهم‌ترین معایب این روسازی شامل هزینه‌ی بالای آن، مشکل بودن کارهای تعمیر و نگهداری و به هم خوردن پیوستگی میلگردها در صورت نیاز به شکافتن روسازی و بالا بودن سطح تنش‌های اصطکاکی در نتیجه تغییرات دما است (حسنی، ۱۳۹۲؛ هوانگ، ۲۰۰۴). در شکل ۲-۶ این روسازی نشان داده شده است.



شکل ۲-۶ مقطع تیپ روسازی بتنی مسلح پیوسته

۲-۳-۴- روسازی بتنی پیش تنیده (PCP)

پیش تنیدگی عبارت است از ایجاد یک کشش ثابت و دائمی در یک روسازی بتنی به اندازه لازم، به طوری که در اثر این تنش، مقداری از تنش‌های ناشی از بارهای وارده بر روسازی خنثی شده و در نتیجه مقاومت باربری روسازی افزایش می‌یابد. ضخامت لازم برای روسازی بتنی بر اساس مدول گسیختگی و مقاومت کششی بتن تعیین می‌شود. اعمال یک تنش فشاری قبلی به بتن، تنش کششی به وجود آمده در بتن به وسیله بارهای ترافیک را کاهش داده بنابراین باعث کاهش ضخامت بتن مورد نیاز می‌شود. از مزایای این نوع روسازی بتنی می‌توان به افزایش طول نسبت به دال‌های معمولی (تا طول ۱۵۰ متر)، کمتر بودن درزها و در نتیجه افزایش کیفیت رانندگی، کاهش ضخامت دال و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از بازشدگی ترک و در نتیجه افزایش ظرفیت حمل بار بیشتر روسازی اشاره کرد. مهم‌ترین معایب آن شامل قطع جریان ترافیک در زمان آسیب دیدگی پیش تنیدگی، محدود شدن شعاع قوس‌های قائم و افقی، نیاز به دانش بالای مهندس ناظر و نیاز به استانداردهای ساخت بالاتر نسبت به بقیه روسازی‌های بتنی می‌باشند (حسنی، ۱۳۹۲؛ هوانگ، ۲۰۰۴).

۲-۳-۵- روسازی بتنی مسلح با الیاف

در طرح روسازی مسیرهای پرتراфик جایگزینی الیاف با آرماتور می‌تواند بسیار مقرون بصرفه و مناسب باشد. زیرا موجب کاهش ضخامت بتن‌ریزی، افزایش سرعت اجرا، افزایش عمر روسازی، کاهش هزینه‌های اجرا و دستمزد، کاهش عرض ترک‌های ناشی از جمع شدگی و کنترل عرض ترک‌های انقباضی و انبساطی، افزایش مقاومت روسازی در برابر ضربه، خستگی و کاهش اثرات مخرب عوامل جوی خواهد شد. بتن معمولی که در روسازی به کار می‌رود یک ماده‌ی ترد و شکننده است، درحالی‌که روسازی بتن الیافی از لحاظ مقاومت بالاتر و خاصیت کاهش احتمال بروز ترک، نسبت به بتن معمولی برتری دارد.

از مهم‌ترین مزایای بتن الیافی نسبت به بتن معمولی می‌توان به مقاومت در برابر تورق، سایش و هوازدگی سطح، مقاومت در مقابل تنش‌های خستگی، مقاومت در مقابل ضربه، قابلیت کشش زیاد، قابلیت باربری بعد از ترک‌خوردگی و طاقت بیشتر (میزان انرژی جذب‌شده قبل از گسیختگی کامل بتن) اشاره کرد. مزایای بتن الیافی نسبت به بتن مسلح نیز شامل کاهش ضخامت دال بتنی، کنترل آب افتادگی، ایجاد همگنی بیشتر، کاهش عرض ترک‌ها، جلوگیری از نشست پلاستیک و سهولت در اجرا است.

۲-۳-۶- روسازی بتنی انعطاف‌پذیر

در طراحی گاهی نیازمند به روسازی است که هم رفتار صلب و هم رفتار انعطاف‌پذیر داشته باشد. سیستم این نوع روسازی بایستی شامل لایه‌های بتنی که در بین آن‌ها یک قشر نازک قیر به عنوان جدا کننده قرار گیرد. در اجرای این نوع روسازی، ضخامت روسازی بتنی متداول به لایه‌هایی با ضخامت کمتر تقسیم شده است و ضمن سهولت در لغزش بین لایه‌ها، از ترک‌خوردگی ناشی از تنش‌های درونی بتن جلوگیری به عمل می‌آید.

با تقسیم ضخامت دال به چند لایه مستقل نازک و قیر به عنوان مصالح بین لایه‌ای، می‌توان یک دال بتنی با خاصیت انعطاف‌پذیری بالاتری ساخت. این نوع دال تحت شرایطی که بستر قابل نشست است تماس بهتری با بستر ایجاد می‌کند. در این نوع روسازی به دلیل امکان جابجایی لایه‌ها بر روی هم تنش‌های ناشی از تابیدگی، در برابر تنش‌های ناشی از تغییر دما کاهش پیدا می‌کند. همچنین این نوع روسازی در برابر تنش‌های اصطکاکی بین لایه‌ای، ناشی از انقباض و انبساط رویه بتنی حاصل از تغییرات دما و رطوبت، نیز رفتار مناسبی از خود نشان می‌دهد. تحقیقات در این زمینه نشان داده است که تنش‌های درونی این نوع روسازی، به علت لایه‌های نازک‌تر کاهش می‌یابد (حسنی، ۱۳۹۲).

۲-۳-۷- روسازی بتنی بلوکی

روسازی بلوکی از تعداد زیادی بلوک که بر روی یک لایه اساس ماسه‌ای و یک بستر از پیش آماده شده، قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. بلوک‌ها از بتن و یا از سفال ساخته شده‌اند و اندازه تقریبی آن‌ها ۱۰۰ میلی‌متر عرض، ۲۰۰ میلی‌متر طول و بین ۶۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر ضخامت است. شکل بلوک‌ها اصولاً مستطیلی است اما ممکن است لبه باریک یا مورب داشته باشند. بلوک‌ها باید علاوه بر ایجاد یک سطح بدون تغییر شکل در برابر بارگذاری ترافیک، باید ویژگی‌های لازم برای ایمنی و راحتی عبور ترافیک و مقاومت لازم در برابر تغییرات آب و هوا را داشته باشد. کاربرد این نوع روسازی بیشتر در پایانه‌های ایستگاه اتوبوس است و این نوع روسازی بسته به طراحی ممکن است به عنوان روسازی انعطاف‌پذیر بسیار مقاوم در نظر گرفته شود. در زمینه‌ی ضخامت روسازی بتنی بلوکی سه ضخامت استاندارد وجود دارد. برای پیاده‌رو و در شرایط عبور ترافیک سبک مانند مسیر عبور ماشین سواری ضخامت ۶۵ میلی‌متر، برای ترافیک معمولی با چرخ‌های پر باد لاستیکی ضخامت ۸۰ میلی‌متر و برای کاربردهای ویژه ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر توصیه می‌شود (حسنی، ۱۳۹۲).

در شکل ۷-۲ نمونه‌ای از روسازی بتنی بلوکی نشان داده شده است.



شکل ۷-۲ دو نمونه روسازی بتنی بلوکی

۲-۳-۸- روسازی بتن غلتکی

بتن غلتکی از نوع روسازی بتنی است که با ماشین‌آلات آسفالتی یا ماشین‌آلات پخش خاک، پخش شده و به وسیله‌ی غلتکی تثبیت می‌شود. این روسازی را جز دسته اول یعنی روسازی بتنی غیر مسلح در زردار با درز انبساط می‌دانند ولی از نظر طرح اختلاط و روش‌های اجرا با یکدیگر متفاوت می‌باشند (کریمی، ۱۳۸۹).

ویژگی این نوع روسازی بتنی مقدار کم آب اختلاط است بنابراین باید دستگاه‌های اختلاط قوی برای ساخت آن بکار برده شود. خشک بودن بتن باعث شده است که بتوان به وسیله غلتک‌های روسازی آسفالتی آن را متراکم کرد. به علت مصرف کم سیمان، جمع شدگی و انقباض کمتر، مقاومت بالا، اجرای سریع و دیگر مزایای این نوع روسازی، از سال ۱۹۸۰ مورد استفاده و مطالعه بیشتر قرار گرفته است. بتن غلتکی مخلوطی از سنگ‌دانه‌های دانه‌بندی شده، سیمان پرتلند و مقدار کمی آب است. مخلوط مانند یک توده همگن است که مقدار اسلامپ آن صفر است. به علت آن که دستیابی به سطح مناسب برای رانندگی مشکل است، این نوع مصالح برای روسازی مسیرهایی با سرعت بالا مناسب نیست. گاهی اوقات الیاف

فولادی با بتن غلتکی مخلوط می‌شود که در این حالت، رول‌فایبر^۱ نامیده می‌شود و این امکان را می‌دهد که یک روسازی با بتن پیوسته بدون درز احداث شود (حسنی، ۱۳۹۲).

۲-۴- کاربردهای روسازی بتن غلتکی

این نوع روسازی برای بارهای سنگین و با سرعت پایین مناسب است. ولی همان طور که در بخش ۲-۱ گفته شد، با اصلاح تجهیزات و روش‌های اجرایی، برای سرعت‌های بالا نیز طراحی می‌شود. از کاربردهای بتن غلتکی می‌توان به مواردی چون محوطه کارگاه‌های چوب و نگهداری الوار چوب، جاده‌های دسترسی معادن، محوطه‌های دپوی زغال‌سنگ، جاده‌هایی با شیب زیاد، محوطه نگهداری کانتینرها، جاده‌های حرکت تجهیزات نظامی، پارکینگ‌ها، پیاده‌روها، خیابان‌های شهری و شانه‌های بزرگراه‌ها، اتوبان‌های درجه دو، خطوط کمکی سبقت، مناطق با ترافیک سنگین و محل‌های پارک هواپیما اشاره کرد. یکی از کاربردهای مهم این روسازی در مناطق شهری، استفاده در مسیر خطوط BRT است. در مسیر BRT احتمال نشت روغن وجود دارد که باعث خرابی روسازی آسفالتی می‌شود بنابراین استفاده از روسازی بتن غلتکی در این مسیرها توصیه می‌شود (ACI325.10R, 2001).

۲-۵- خواص مهندسی بتن غلتکی

خصوصیات مقاومتی RCCP در وهله اول وابسته به مقدار مواد سیمانی، کیفیت سنگ‌دانه‌ها و مقدار تراکم است. اگر چه سال‌هاست که از استفاده RCCP می‌گذرد، ولی هنوز تحقیقات بسیار محدودی در خصوص خواص مهندسی آن انجام گرفته است. نوع مصالح سیمانی تأثیر زیادی در هیدراتاسیون و روند افزایش مقاومت مخصوصاً در سنین پایین بتن دارد.

^۱ Roll Fiber

۲-۵-۱- مقاومت فشاری

برای رویه اصلی راه، به بتن غلتکی با مقاومت فشاری و دوام بالا نیاز است. مقاومت فشاری بتن غلتکی برای روسازی بیشتر از مقاومت فشاری مورد نظر در سدسازی است. برای بتن غلتکی سدسازی چون مسائل حرارتی اهمیت زیادی دارند، طرح اختلاط با حداقل سیمان استفاده می‌شود. این در حالی است که برای بتن غلتکی روسازی مشکل حرارت‌زایی و پایین نگه‌داشتن مقدار سیمان اهمیت ندارد. لذا مقدار سیمان آن‌ها بیشتر از بتن غلتکی سدسازی است. در سدسازی به مقاومت بالای بتن نیازی نیست بنابراین نسبت آب به سیمان بالا بوده و اغلب بین ۰/۵ تا ۱ تعیین می‌شود. حداقل مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی در آیین‌نامه برابر ۲۷/۶ مگاپاسکال تعیین شده است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸). در برخی کشورها که الزامات بارگذاری و شرایط جوی شدیدتری وجود دارد (مانند سوئد) مقاومت بیشتری مورد نیاز است. میزان تراکم در مقدار مقاومت بتن غلتکی نقش مهمی دارد. این مخلوط که حاوی سیمان است برخلاف خاک‌ها، قابلیت واکنش هیدراتاسیون و کسب مقاومت در طی زمان را دارد. بنابراین مقاومت بتن غلتکی علاوه بر میزان تراکم، به درصد آب به سیمان (W/C) نیز وابسته است و مانند سایر بتن‌ها با کاهش W/C ، مقاومت آن افزایش می‌یابد. در نمونه‌های بتن غلتکی مانند دیگر بتن‌ها، با افزایش زمان عمل‌آوری، به دلیل فرآیند هیدراتاسیون مقاومت فشاری بتن نیز افزایش می‌یابد.

۲-۵-۲- مقاومت کششی غیرمستقیم (دونیم شدن)

برای بتن غلتکی مقاومت کششی معمولاً کمتر از بتن‌های معمولی است. مخلوط‌های با مصالح عادی و مقدار زیاد سیمان مخصوصاً در سنین پایین، مقاومت کششی بهتری دارند. مقاومت کششی غیرمستقیم با آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده یا مغزه‌گیری شده انجام می‌شود. مقاومت کششی اغلب به

عنوان درصدی از مقاومت فشاری بیان می‌شود و با توجه مصالح و مقدار سیمان عددی بین ۷٪ تا ۱۳٪ آن است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۵-۳- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی RCCP به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی مطرح است. برای این آزمایش یا نمونه خمشی در آزمایشگاه ساخته می‌شود و یا اینکه از روسازی ساخته شده نمونه‌ی منشوری بریده و آزمایش می‌شود. مقاومت خمشی نیز مانند مقاومت فشاری به نسبت w/c و میزان تراکم وابسته است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۵-۴- کارآیی

RCCP در حالت تازه با بتن معمولی متفاوت است به گونه‌ای که خشک‌تر و کارآیی آن کمتر است. کارآیی از پارامترهای مهم است که بر روی تراکم بتن نقش دارد. بتن غلتکی در حالت تازه باید به گونه‌ای باشد که قابلیت تحمل وزن غلتک را داشته باشد. بنابراین باید میزان آب آن بسیار کمتر از بتن‌های معمولی باشد. روش‌های تعیین روانی و کارآیی برای این نوع بتن کارآمد نبوده و به وسیله‌ی آزمایش وی بی^۱ اصلاح شده روانی آن تعیین می‌گردد (PCA^۲, 2010). در این آزمایش از دستگاه وی بی استاندارد همراه با یک سربرار استفاده می‌شود که مقدار سربرار با توجه به مراجع مختلف متفاوت است (ACI325.10R, 2001). در این آزمایش مخلوط RCCP داخل ظرف استوانه‌ای فلزی که روی میز ویبره قرار دارد ریخته می‌شود. یک سربرار فلزی استوانه‌ای که قطر آن از قطر ظرف کمتر است (امکان دیدن اطراف سربرار درون استوانه وجود دارد) روی مخلوط بتنی قرار می‌گیرد. سپس میز ویبره شروع به ارتعاش کرده و تا زمانی که شیره ملات محیط سربرار را فرا می‌گیرد این ارتعاش ادامه پیدا می‌کند و مدت‌زمان

¹ VeBe

² Portland Cement Association

ارتعاش به دست می‌آید. این روش مطابق استاندارد ASTM C1170 انجام می‌شود. زمان توصیه شده برای بتن غلتکی روسازی بین ۳۰ تا ۵۵ ثانیه توصیه شده است.

یکی از مسائل مهم بتن غلتکی، کاهش کارآیی آن پس از ساخت مخلوط در طی زمان و شروع گیرش بتن است. این امر سبب شده است که در برخی از کشورها روش‌هایی برای تعیین فرصت کاری و زمان گیرش مخلوط‌های بتن غلتکی ارائه شده است. در اکثر روش‌ها از امواج مافوق صوت استفاده می‌شود برای مثال در فرانسه زمان عبور پالس‌های مافوق صوت در میان یک نمونه مخلوط بتنی در طی زمان گیرش به صورت پیوسته ثبت می‌شود. در اسپانیا اندازه‌گیری انرژی امواج مافوق صوت نتایج دقیق‌تری را نشان می‌دهد. فرصت کاری بسیار به دما وابسته است بنابراین آزمایش‌ها باید در کابینت‌های مجهز به کنترل کننده‌ی درجه حرارت انجام شوند. روان کننده‌ها جهت افزایش کارایی و کند گیر کننده‌ها جهت افزایش فرصت کاری کاربرد دارند (PIARC, 1993).

۲-۵-۵- جرم حجمی و درجه تراکم

بتن غلتکی در حالت تازه حالتی مانند خاک نمدار دارد ولی در حالت سخت شده مشابه بتن‌های معمولی است. با توجه به مقدار کم آب در صورت تراکم مناسب، جرم حجمی RCCP مقداری بیشتر از بتن‌های معمولی است. جرم حجمی حدود ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بتن‌های غلتکی مقداری متعارف است. همان‌طور که گفته شد میزان تراکم تأثیر زیادی بر جرم حجمی این نوع بتن دارد. رفتار بتن غلتکی در حالت تازه تحت انرژی تراکم مشابه رفتار خاک می‌تواند فرض شود و مبنای ژئوتکنیکی چگالی حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای بتن‌های غلتکی قابل اعمال است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۵-۶- آب انداختگی^۱

مشکل آب انداختگی در روسازی بتنی‌های معمولی از موارد مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد ولی در بتن غلتکی چون آب اختلاط کم است، پدیده‌ی آب انداختگی اتفاق نمی‌افتد و این خود از مزایای بتن غلتکی نسبت به روسازی بتنی معمولی است (اندرسون^۲، ۱۹۸۷).

۲-۵-۷- جداسدگی^۳

یکی از مسائل مهم در طرح اختلاط بتن غلتکی سدسازی، جلوگیری از جداسدگی سنگ‌دانه‌ها است. عواملی چون خشک بودن مخلوط، کم بودن مقدار سیمان، درشت بودن سنگ‌دانه‌ها (حداکثر ۷۶ میلی‌متر) باعث تشدید شدن این پدیده شده است. در مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی اندازه حداکثر سنگ‌دانه بسیار کمتر است (حداکثر ۱۹ میلی‌متر) و نیز مقدار سیمان این مخلوط‌ها بیشتر از بتن غلتکی سدسازی است. بنابراین اگرچه مخلوط روسازی بتن غلتکی بسیار خشک است ولی مسائل جداسدگی در این مخلوط‌ها بسیار کمتر از مخلوط بتن غلتکی سدسازی مشکل آفرین است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۵-۸- خستگی^۴

یکی از عواملی که سبب از بین رفتن قابلیت خدمت‌دهی روسازی‌های بتنی می‌شود، ترک‌خوردگی ناشی از خستگی است. هرگاه این نوع ترک پدید آید در واقع یک فاز خرابی سازه‌ای اتفاق افتاده است که باعث تغییر حالت تنش‌ها و تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم لایه‌های تشکیل دهنده‌ی سازه

¹ Bleeding

² Anderson

³ Segregation

⁴ Fatigue

روسازی می‌شوند (تریس^۱، ۱۹۹۸).

گسیختگی ناشی از خستگی دو مرحله دارد:

- ایجاد ترک‌های مویی بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها
- رشد ترک‌های مویی و تشکیل ترک اصلی

ضعف تدریجی در مصالح اتفاق می‌افتد و با تکرار بارگذاری سبب تخریب روسازی بتنی می‌گردد.

در برزیل تحقیقات زیادی در رابطه با رفتار خستگی بتن غلتکی انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان داد که بتن غلتکی دارای رفتار خستگی شبیه به روسازی بتنی معمولی است. همچنین برای مقادیر درصد سیمان مشابه، بتن غلتکی مقاومت بیشتری در برابر خستگی نشان می‌دهد. دلیل این امر پایین بودن نسبت آب به سیمان در روسازی بتن غلتکی است. البته دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها نیز نقش بسیار مهمی در رفتار خستگی دارد. در مخلوط‌هایی با درصد سنگ‌دانه درشت‌تر مشاهده شده است که پس از گذشت زمانی برابر ۴۵ درصد عمر خستگی، ترک‌ها شروع به رشد کرده، این در حالی است که در مخلوط‌های با سنگ‌دانه ریزتر ترک‌ها با سرعت کمتری رشد می‌کنند. به صورتی که شروع آن پس از گذشت ۶۵ درصد عمر خستگی است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۵-۹- دوام در برابر ذوب و انجماد

به دلیل روش ساخت بتن غلتکی ایجاد هوازایی جهت مقاوم‌سازی آن در برابر شرایط ذوب و انجماد کار دشواری است (ACI325.10R, 2001). بنابراین در اکثر پروژه‌ها هوازایی انجام نشده است. تحقیقات اخیر نتایج موفقیت‌آمیزی در رابطه با هوازایی نشان داده‌اند. نتایج نشان داد که مقدار ماده‌ی هوازا باید در

¹ Tricbes

حدود ۵ برابر بیشتر از آنچه برای بتن‌های معمولی به کار می‌رود، استفاده شود. شکل حباب‌های هوای ایجاد شده نیز کروی نیست (نایک و همکاران^۱، ۲۰۰۱). در شرایط ذوب و انجماد شدید اطلاعاتی در مورد عملکرد بتن غلتکی در دسترس نیست اما در شرایط متوسط نتایج حاکی از عملکرد خوب بتن غلتکی است. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقیاس بزرگ پذیرفته شده است که بتن غلتکی در هر شرایط آب و هوایی قابل استفاده است (PIARC, 1993).

۲-۵-۱۰- دوام در برابر سولفات‌ها

با کاربرد سیمان نوع V (سیمان ضد سولفات) بتن‌های غلتکی دوام خوبی در محیط‌های سولفاتی دارند. تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه نشان داد که حتی مخلوط‌های بتنی که مقدار سیمان در آنها ۹ درصد وزن مصالح خشک که درون محلول سولفات ۵ درصد از ۱ تا ۶ ماه نگهداری شدند، در مقایسه با نمونه‌های شاهد که درون آب نگهداری شدند، تنها ۹ درصد افت مقاومت پیدا کردند. علاوه بر این عملکرد بتن غلتکی با افزایش مقدار سیمان ۱۲ تا ۱۵ درصد بهبود می‌یابد (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۵-۱۱- انقباض ناشی از خشک شدن^۲

انقباض ناشی از خشک شدن از ویژگی‌های انواع بتن‌ها (مصالح پایه سیمانی) است. با توجه به میزان زیاد جمع شدگی در بتن معمولی برای مقابله با ترک خوردگی تصادفی ناشی از آن، فاصله‌ی درزها حدود ۴ تا ۶/۸ متر حدود ۲۴ ساعت بعد از اجرای روسازی بتنی ایجاد می‌شود. چون کاربرد بتن غلتکی اغلب برای روسازی با بارهای سنگین است، بریدن درزها مشکلاتی در خصوص خرد شدن لبه‌ی درزها ایجاد می‌کند. بنابراین معمولاً از بریدن درزها جلوگیری شده و اجازه می‌دهند که ترک‌ها به صورت تصادفی ایجاد شوند. فواصل بین ترک‌ها از حدود ۱۰ تا ۲۵ متر و حتی برای برخی روسازی‌ها با ضخامت بیشتر،

¹ Naik et al.

² Drying Shrinkage

فواصل طولانی‌تری گزارش شده است (پیتمن^۱، ۱۹۹۶).

۲-۵-۱۲- جذب آب

جذب آب بتن از خواص مهم به ویژه از جهت امکان نفوذ مواد و املاح خورنده و یا اشباع شدن آن است. در تحقیقی که توسط غفوری و ژانگ^۲ در سال ۱۹۹۸ صورت گرفته است، درصد جذب آب مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی که به صورت آزمایشگاهی و با مقادیر سیمان به صورت درصد وزنی مصالح خشک برابر ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد ساخته شده بودند، تعیین و به ترتیب مقادیر ۳، ۲/۵ و ۲ درصد گزارش شده است. با توجه به اینکه مقادیر جذب آب بتن معمولی زیر ۵ درصد است، بر این اساس مقادیر بالا نشانگر جذب آب کم مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی است. مطالعه دیگری که روی نمونه‌های مغزه گیری شده از روسازی آزمایشی بتن غلتکی اجرا شده انجام گردید، مقدار جذب آب حدود ۳/۵ درصد گزارش شده است (دلاگریو و همکاران^۳، ۱۹۹۷). در این مخلوط مقدار مواد سیمانی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزن مصالح خشک در نظر گرفته شده است که این نیز نتایج آزمایش غفوری را تائید می‌کند.

۲-۶- عملکرد بتن غلتکی

۲-۶-۱- انتقال بار از درزها^۴

انتقال بار در طراحی روسازی‌های بتنی اهمیت زیادی دارد، زیرا تنش‌های زیاد در نزدیکی محل درز را کاهش می‌دهد و بنابراین ضخامت طراحی روسازی را کمتر می‌شود. آیین‌نامه مهندسين ارتش آمریکا و

¹ Pittman

² Ghaffori & Zhang

³ Delagrave et al.

⁴ Load Transfer

آیین‌نامه سازمان هوانوردی آمریکا برای طراحی ضخامت روسازی‌های بتنی حداقل ۲۵ درصد انتقال نیرو در محل درز را در نظر می‌گیرند. در روسازی بتنی معمولی انتقال بار در محل درزهای از پیش تعیین شده عمدتاً از طریق داول‌ها و یا برش گیرها صورت می‌گیرد. اگر روسازی بتن معمولی بدون داول و برش گیر باشد آنگاه با کاهش فواصل درزهای بریده شده عرض درز محدود می‌گردد و بنابراین انتقال نیرو از طریق درگیر شدن سنگ‌دانه‌ها در دو طرف درز انجام می‌شود. در روسازی‌های بتن غلتکی امکان ایجاد داول یا برش گیر وجود ندارد. از سوی دیگر بریدن درز در این نوع روسازی‌ها کمتر متداول است و عمدتاً اجازه می‌دهند ترک‌ها به صورت طبیعی ایجاد شوند که منجر به فواصل نسبتاً طولانی ترک و همچنین متغیر بودن این فواصل می‌گردد. بر این اساس امکان بازشدگی ترک در این نوع روسازی‌ها بیش از روسازی‌های بتنی معمولی است. آیین‌نامه‌های طراحی مقدار انتقال بار را در درزها برای روسازی‌های بتن غلتکی را برابر صفر در نظر می‌گیرند (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸؛ ACI 325.10R, 2001). این رویکرد می‌تواند باعث افزایش ضخامت بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی گردد. نتایج نشان داده است که در بتن غلتکی اجرا شده مقدار انتقال بار در محل درزها از ۴ تا ۶۹ درصد متغیر بوده و مقدار ۱۱ درصد به صورت محافظه‌کارانه‌ای می‌تواند جهت انتقال بار برای این نوع روسازی‌ها در نظر گرفته شود. طبق بررسی انجام شده، در صورت در نظر گرفتن ۱۱ تا ۱۵ درصد انتقال بار از درزها برای بتن غلتکی، ضخامت طراحی این نوع روسازی ۲ تا ۱۷ درصد کاهش می‌یابد (پیتمن، ۱۹۹۶).

۲-۶-۲- اتصال بین لایه‌ها (مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها)

اتصال بین لایه‌های بتن غلتکی در مواردی که روسازی بتن غلتکی در بیش از یک لایه اجرا شود تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری و عملکرد روسازی خواهد داشت. اگر اتصال سرد بین لایه‌ها اتفاق بیفتد مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها کم خواهد بود. نسبت مقاومت چسبندگی بین دو لایه بتن غلتکی به مقاومت کششی بتن در خود لایه‌ها باید کافی باشد. گزارش انجمن بتن آمریکا حداقل این مقدار را برابر

۵۰ درصد توصیه می‌کند. بررسی آزمایش‌های انجام شده روی پروژه‌های مختلف در آمریکا نشانگر آن است که در اکثر موارد مقاومت چسبندگی در حد قابل قبول بوده است. فاصله زمانی بین اجرای لایه‌ها، شرایط محیطی و نوع مخلوط بتن غلتکی تأثیر زیادی در مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها دارند. بنابراین برخی نتایج روی بتن‌های اجرا شده حاکی از آن است که اتصال بین لایه‌ها در نزدیکی لبه روسازی بتن غلتکی در امتداد طولی که امکان تراکم مناسب آن با غلتک فراهم نیست ضعیف‌تر از اتصال در بخش‌های داخل بتن غلتکی است (ACI 325.10R, 2001).

در خصوص ضرورت چسبندگی بین لایه‌ها که کاملاً به فواصل زمانی بین اجرای چند لایه متوالی و تا حد امکان کوتاه نمودن این فواصل بستگی دارد، انجمن مهندسين ارتش آمریکا پیشنهاد می‌نماید در ماه‌های سردتر سال چنانچه زمان تأخیر از یک ساعت تجاوز نکند یا در ماه‌های گرم‌تر سال این تأخیر بیشتر از چهل و پنج دقیقه نشود، لایه‌ها به یکدیگر خواهند چسبید. جهت اتصال بین لایه‌ها می‌توان از روش‌هایی نظیر زبر کردن سطح لایه استفاده کرد. در این روش لازم است که قبل از اینکه مصالح بتنی در قسمت سطحی اجرا گردد عمل زبر نمودن کامل گردد. استفاده کنترل شده از مواد کندگیر ممکن است باعث افزایش این فاصله زمانی گردد که در هر حال این موضوع نیاز به ارزیابی شرایط خاص پروژه دارد. در محلی که چسبندگی بیشتری نیاز باشد از تکنیک‌های مختلفی نظیر بافت‌دار کردن سطح از طریق دندانه‌دار کردن آن‌ها به کمک غلتک‌های پاچه‌بزی انجام می‌شود (هادکینسون^۱، ۱۹۹۱).

بهترین تکنیک در حال حاضر با وجود سیر تکاملی آن، استفاده از دوغاب سیمان در سطح به محض تمام شدن روسازی است. این نکته حائز اهمیت است که دوغاب سیمانی تا قبل از ریختن لایه دوم شروع به خشک شدن ننماید. اگر چنین امری به وقوع نپیوندد، جداشدگی بین لایه‌ها به احتمال زیاد رخ خواهد

¹ Hodgkinson

داد همچنین باید به این موضوع توجه گردد که درحالی که یک فاصله زمانی کوتاه بین اجرای لایه‌ها مدنظر است باید اطمینان حاصل شود که هر لایه به اندازه کافی کوبیده شده و سپس لایه بعدی اجرا گردد (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۶-۳- مقاومت در برابر لغزش^۱

در مسیرهایی با سرعت بالای ترافیک و یا حجم ترافیک بالا و همچنین در باند فرودگاه‌ها مسئله مقاومت کافی سطح در برابر لغزندگی از اهمیت زیادی برخوردار است. در روسازی‌های بتنی معمولی برای بهبود مقاومت در برابر لغزش در مسیرهای ذکر شده، باید بافت زبری روی سطح بتن ایجاد گردد که به این کار ایجاد بافت می‌گویند. ایجاد بافت روسازی‌های بتنی معمولی اغلب در حالت تازه و از طریق کشیدن جارو یا گونی خیس یا برس‌های خاص روی سطح بتن انجام داده می‌شود. در صورتی که سطح روسازی بتن سخت شده دارای بافت نباشد و یا بافت ایجاد شده فرسوده شده باشد، می‌توان با کاربرد تیغه‌های گردنده شیار زن بافت زبر مورد نظر را روی سطح روسازی بتنی ایجاد کرد (ACI 325.6R-88, 2000).

سال‌های آغازی کاربرد روسازی‌های بتن غلتکی که استفاده از آن محدود به روسازی‌های تحت بارهای سنگین و سرعت پایین ترافیک بود، عامل مقاومت در برابر لغزش اهمیت زیادی نداشت. اما با توسعه کاربرد این نوع روسازی در راه‌های با سرعت بالا، بررسی این پارامترها اهمیت زیادی پیدا کرده است (ACI 325.10R, 2001).

در روسازی بتنی معمولی بافت درشت سطح روسازی از طریق ایجاد بافت زبر و شیاردار در روی سطح بتن حاصل می‌گردد. بافت سطح روسازی‌های بتن غلتکی اغلب غیر مرتبط و با فضاهای خالی و نسبتاً باز

^۱ Skid Resistance

هستند که البته وضعیت بافت به نوع مخلوط و روش ریختن و تراکم بستگی دارد. تحقیقات انجام شده نشان داده است که عدم اتصال فضاهای خالی باز سطحی، مانع از امکان رد شدن کامل آب از بین لاستیک و سطح روسازی بوده و بنابراین موجب سرخوردن روی لایه آب می‌گردد. همچنین بافت ریز بتن غلتکی که نشانگر وضعیت سطح بتن در بین فضاهای خالی گفته شده است، مقاومت زیادی در برابر لغزش لاستیک ندارد. در استرالیا نیز آزمایش‌های تعیین اصطکاک سطحی روسازی بتن غلتکی انجام پذیرفته است. آزمایش‌ها در سرعت‌های ۵۱ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت انجام شد. نتایج ضریب نیرو جانبی در محدوده ۴۵ تا ۶۲ را برای محدوده پائین سرعت فوق و ۳۸ تا ۵۱ را برای محدوده بالای سرعت فوق نشان می‌دهد. این مقادیر به میزان قابل توجهی کمتر از مقادیر متعارف این پارامتر ویژه روسازی آسفالتی است (ACI 325.10R, 2001)

۲-۶-۴- مسطح بودن سطح یا همواری^۱

در واقع مسطح بودن یا صافی سطح معیاری از عدم وجود پستی و بلندی و موج‌دار بودن سطح روسازی است. هر چه سرعت ترافیک مورد نظر برای یک سطح روسازی بیشتر باشد، مقادیر بالاتری از معیار مسطح بودن اعمال می‌گردد تا کیفیت قابل قبول تردد روی سطح حاصل شود. دستیابی به سطوح صاف با روش روسازی بتن غلتکی خصوصاً در اوایل توسعه آن دشوار بوده است. بنابراین کاربرد این نوع روسازی معمولاً در روسازی‌های ویژه ترافیک با سرعت‌پایین و وسایل نقلیه سنگین رایج بوده است. به نظر می‌رسد مشکل اصلی ناصافی در هنگام کوبش با غلتک رخ می‌دهد و در صورتی که بخش قابل توجهی از تراکم پس از ریختن بتن روسازی توسط دستگاه‌های روسازی برای غلتک باقی بماند ناصافی تشدید می‌گردد. پس از سال ۱۹۸۵ که تجهیزات اجرای روسازی آسفالتی جهت اجرای روسازی‌های بتن غلتکی

^۱ Smoothness

اصلاح شده و مجهز به میله‌های کوبنده نیز گردید کیفیت صافی سطح این نوع روسازی‌ها بهبود یافت. این تجهیزات قابلیت تراکم تا ۹۵٪ تراکم به روش استاندارد پروکتور را داشته و بنابراین میزان تراکم کمی برای مرحله غلتک زنی باقی مانده و کیفیت صافی سطح بهبود می‌یابد (ACI 325.10R, 2001) در خصوص معیارهای مسطح بودن سطح، آیین‌نامه مهندسين ارتش آمریکا حداکثر انحراف از صافی سطح برای روسازی بتنی فرودگاهی و مسیر تاکسی‌ها را به ۳ میلی‌متر در طول ۳ متر محدود می‌کند. برای روسازی با سرعت کمتر مانند پارکینگ‌ها و محوطه تردد وسایل نقلیه سنگین نظامی آیین‌نامه ذکر شده حداکثر انحراف صافی از سطح را به ۶ میلی‌متر در ۳ متر محدود می‌نماید. همچنین برای روسازی بتن غلتکی با توجه به مشکلات موجود در دستیابی به صافی سطح برای کاربرد مشابه با موارد ذکر شده در این نوع روسازی حداکثر انحراف از صافی برابر ۹/۵ میلی‌متر در طول ۳/۷ متر را مجاز می‌داند.

ازجمله مهم‌ترین عواملی که می‌توانند باعث تشدید عدم صافی سطح شوند می‌توان به ضخامت زیاد لایه بتن غلتکی، عدم تراکم کافی توسط دستگاه فینیشر، ماندن بخش قابل‌توجهی از تراکم برای غلتک و ضعیف بودن زیرسازی اشاره کرد. بنابراین کنترل عوامل فوق در بهبود ناهمواری سطح تأثیر زیادی دارد (مالیش^۱، ۱۹۸۸).

۲-۶-۵- کیفیت تردد^۲

کیفیت تردد و یا همان ناصافی روسازی به میزان راحتی و یا عدم راحتی فرد در خودرو در حین راندن روی روسازی مورد نظر گفته می‌شود. تحقیقات در این زمینه نشان داده است که پروفیل طولی سطح روسازی در مسیر چرخ خودرو خصوصاً دامنه و فرکانس پروفیل طولی جاده بیشترین تأثیر را در میزان راحتی فرد دارد. برای تعیین ناصافی، تجهیزات مختلفی وجود دارد که مقدار تجمعی پستی و بلندی جاده

^۱ Malish

^۲ Ride Ability

در کیلومتر یا مایل طول جاده را اندازه‌گیری می‌کنند. گاهی نیز دفعاتی که میزان پستی و بلندی در طول کیلومتر یا مایل از حد مشخصی بیشتر می‌شود را ثبت می‌کنند. از جمله ابزارهای اندازه‌گیری پارامترهای مرتبط به کیفیت تردد می‌توان به جاده سنج، ناهمواری سنج و یا پروفیل سنج اشاره کرد.

۲-۶-۶- مقاومت در برابر سایش

طبق تعریف ساییدگی یا فرسودگی به خارج شدن ذرات جامد از یک سطح مشخص اطلاق می‌گردد. این خاصیت شامل دو نوع خرابی سایش و فرسایش است. مقاومت در برابر سایش و فرسایش در سازه‌های هیدرولیکی و روسازی از اهمیت زیادی برخوردار است. اصطلاح ساییدگی معمولاً به سایش در حالت خشک بین سطوح اطلاق می‌شود و اصطلاح فرسایش به‌طور کلی برای تشریح سایش سطحی به وجود آمده توسط سیالاتی که شامل ذرات جامد معلق هستند، بکار می‌رود. بتن استفاده شده در روسازی باید مقاومت کافی در برابر سایش حاصل از ترافیک عبوری انواع وسایل نقلیه را داشته باشد. با توجه به اینکه بیشتر حجم بتن از سنگ‌دانه‌ها تشکیل شده است سنگ‌دانه به عنوان جز اصلی برای جلوگیری از خرابی بتن تحت تأثیر سایش قرار می‌گیرد. با وجودی که نوع سنگ‌دانه در مقاومت سطح در برابر ساییدگی مهم است، مقاومت مکانیکی نیز به عنوان یک فاکتور مهم محسوب می‌گردد. معمولاً مقاومت در برابر ساییدگی با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد به همین دلیل در زمانی که بتن تحت تأثیر سایش سطحی قرار می‌گیرد، توصیه‌هایی در خصوص حداقل مقاومت فشاری برابر ۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال انجام گرفته است.

تحقیقات انجام گرفته در استرالیا نشان دهنده این است که مقاومت در برابر سایش بتن غلتکی قابل قبول بوده و عمل‌آوری بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی از اهمیت بیشتری برخوردار است. عمل‌آوری کم باعث ایجاد یک رویه سطحی ضعیف می‌گردد. این تحقیقات حاکی از این است که مقاومت در برابر سایش بتن غلتکی با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و رابطه‌ای مستقیم دارند (PIARC, 1993).

۲-۷- مصالح مصرفی در بتن غلتکی روسازی راه

در بتن‌های غلتکی روسازی همانند بتن‌های معمولی اجزا تشکیل دهنده عمدتاً شامل سیمان، سنگ‌دانه‌ها و آب است. همچنین مواد افزودنی معدنی به‌عنوان مواد مکمل سیمان و مواد افزودنی شیمیایی جهت اصلاح خواص در مواردی به کار می‌روند. در ادامه به هریک از مصالح اصلی و افزودنی که ممکن است در ساخت رویه بتن غلتکی مورد استفاده قرار گیرد، اشاره می‌شود.

۲-۷-۱- مصالح اصلی

۲-۷-۱-۱- سیمان

همه انواع سیمان پرتلند به‌جز سیمان نوع III (سیمان با روند سریع سخت شدن)، می‌توانند در ساخت مخلوط‌های بتن غلتکی به کار روند. سیمان نوع III به علت گیرش سریع‌تر نسبت به دیگر انواع سیمان برای ساخت روسازی بتن غلتکی مناسب نبوده و نباید به کار رود. درواقع مواد سیمانی مورد استفاده در بتن غلتکی شامل سیمان پرتلند یا سیمان پرتلند آمیخته و گاهی سیمان به همراه پوزولان یا سرباره اضافه شده به صورت مجزا است. خاکستر بادی کلاس F یا C نیز در صورت لزوم می‌تواند در ساخت بتن غلتکی استفاده شود (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸؛ USACE^۱). در کاربرد سیمان‌های پرتلند آمیخته حاوی پوزولان یا سرباره، روند کندتر کسب مقاومت این نوع سیمان‌ها باید با توجه به ملاحظات نظیر مدت زمان عمل‌آوری لازم و همچنین زمان بهره‌برداری از روسازی مد نظر قرار گیرند. به هر حال مقاومت‌های تعیین شده در مقاطع زمانی مورد نظر باید توسط بتن غلتکی ساخته شده با سیمان مورد استفاده حاصل گردد. سیمان مصرفی باید الزامات استاندارد ایران را برای نوع سیمان مورد نظر ارضا نماید. در صورتی که آب و یا خاکی در تماس با روسازی بتن غلتکی است حاوی املاح سولفاتی باشد، لازم است

^۱ United States Army Corps of Engineers

بسته به شرایط از سیمان نوع II و یا نوع V استفاده گردد. میزان مواد سیمانی معمولاً ۱۲ تا ۱۶ درصد وزن مصالح خشک است. انتخاب مواد سیمانی بر اساس در دسترس بودن، عوامل اقتصادی و تجهیزات طراحی است (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۱-۷-۲- سنگدانه‌ها

انتخاب منبع مناسب سنگدانه یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در کیفیت و هزینه بتن غلتکی است. سنگدانه‌ها حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد از حجم مخلوط بتن غلتکی را تشکیل می‌دهند. بنابراین تأثیر قابل زیادی بر خواص بتن سخت شده و بتن تازه دارند. انتخاب سنگدانه‌های مناسب باعث صرفه اقتصادی و بهره‌برداری بهتر از روسازی راه خواهد شد. سنگدانه‌های مصرفی در ساخت روسازی بتن غلتکی باید دارای کیفیت و دانه‌بندی مناسب باشند. سنگدانه‌ها به‌صورت طبیعی یا شکسته و یا مخلوطی از این دو می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. سنگدانه‌های به کار رفته در بتن غلتکی روسازی باید دارای بخش ماسه به صورت مجزا و بخش شن به صورت مجزا باشند (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸). الزامات عمومی سنگدانه‌ها باید مطابق الزامات استاندارد ۳۰۲ ایران و یا استاندارد آمریکا ASTM C33 باشند. علاوه بر موارد ذکر شده در استانداردهای بالا، سنگدانه‌های مصرفی باید الزامات ذیل را نیز ارضا نمایند:

- اندازه حداکثر شن مصرفی باید به ۲۰ میلی‌متر (تا ۱۹ میلی‌متر یا ۳/۴ اینچ مجاز است) محدود

گردد تا امکان دستیابی به کیفیت مطلوب سطح فراهم آید. (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸؛ ACI

(325.10R, 2001)

- هرچند ASTM C33 مقدار حداکثر عبوری از الک شماره ۲۰۰ را به ۵ درصد وزن ماسه محدود کرده است، لیکن در صورتی که مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰ برای ماسه، غیر پلاستیک باشند،

مقادیر بالاتر نیز مجاز است. بالا بودن مواد بسیار ریز غیر پلاستیک به عنوان یک پرکننده معدنی می‌تواند در بتن غلتکی مفید باشد و مقدار خمیر را در مخلوط افزایش دهد. لذا در صورت غیر پلاستیک بودن مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰ حداکثر مقدار این مواد به صورت درصدی از وزن کل سنگ‌دانه‌ها می‌تواند تا حداکثر ۸ درصد مجاز تلقی گردد (ACI 325.10R, 2001).

بتن غلتکی که حاوی شن طبیعی است معمولاً مقدار آب کمتری نسبت به بتن غلتکی که حاوی شن شکسته برای رسیدن به یک مقدار روانی خاص، نیاز دارد. بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته به انرژی بیشتری برای تراکم نیاز خواهد داشت. همچنین بتن غلتکی حاوی شن شکسته معمولاً مقاومت خمشی بیشتری به دست می‌دهد. میزان انسجام و چسبندگی مخلوط‌های بتن غلتکی به اندازه بتن معمولی نیست، لذا پدیده‌ی جداسازی سنگ‌دانه در مورد آن‌ها، بیشتر اهمیت دارد.

۲-۷-۱-۳- آب

کیفیت آب برای ساخت بتن غلتکی روسازی باید مشابه کیفیت آب برای بتن‌های معمولی باشد.

۲-۷-۲- مواد و مصالح افزودنی

در ساخت بتن غلتکی می‌توان از مواد افزودنی شیمیایی و معدنی در مقادیر مجاز و مطابق با آیین‌نامه و استانداردها استفاده کرد. با توجه به مقدار کم آب در مخلوط‌های بتن غلتکی و همچنین پایین بودن کارایی آن‌ها، مواد افزودنی شیمیایی در مقادیر مصرف متعارف، عملکرد مناسبی در بتن‌های غلتکی نداشته‌اند. دستیابی به هوازایی در بتن‌های غلتکی دشوار و نیازمند مقادیر مصرف بسیار بالاتر نسبت به بتن‌های معمولی است. به این دلیل در شرایطی که احتمال ذوب و انجماد بتن‌های غلتکی روسازی می‌رود باید نسبت آب به سیمان مخلوط پایین بوده و همچنین لایه اساس زیر بتن غلتکی دارای زهکشی مناسب

باشد، به نحوی که روسازی بتن غلتکی تحت شرایط اشباع قرار نگیرد. در خصوص مواد روان ساز نیز باید توجه داشت که دستیابی به خواص مورد نظر دشوار بوده و نیازمند مصرف مقادیر بالاتر نسبت به بتن های متعارف است. همان طور که در بخش مواد سیمانی ذکر شد، در ساخت بتن های غلتکی، در صورت لزوم، می توان از سیمان پرتلند آمیخته یا از سیمان پرتلند و پوزولان و یا سرباره به صورت مجزا استفاده نمود. در این صورت کیفیت پوزولان یا سرباره مصرفی باید مطابق با الزامات استانداردهای ASTM C989 و ASTM C816 باشد.

۲-۷-۲-۱- سیلیس^۱

در بتن غلتکی از سیلیس برای استحکام بیشتر و مقاومت در برابر یخ زدگی استفاده می شود. کیفیت بتن غلتکی به طور مستقیم به درجه تراکم به دست آمده مربوط بوده و وزن مخصوص خشک می تواند به عنوان اندازه گیری تراکم در نظر گرفته شود. استفاده از فوق روان کننده چگالی خشک را در بتن غلتکی افزایش می دهد و زمانی که توأم با سیلیس به مخلوط اضافه شود تأثیر آن بیشتر می شود. اما سیلیس به تنهایی نمی تواند چگالی خشک را افزایش دهد. استفاده از دوده سیلیسی باعث کاهش ضریب نفوذپذیری می شود و این کاهش نفوذپذیری در زمان کوتاه تری اتفاق می افتد. استفاده از دوده سیلیس تا ۱۰ درصد وزنی سیمان در خواصی نظیر مقاومت، مطابق گزارش ها در برخی کشورها نظیر نروژ، دانمارک و استرالیا، استفاده از دوده سیلیسی به میزان ۱۰ درصد مصالح سیمانی باعث افزایش مقاومت ۲۸ روزه از ۴۰ به ۵۰ مگاپاسکال و مقاومت ۹۰ روزه از ۵۰ به ۶۰ مگاپاسکال رسیده است (ویلنا و همکاران^۲، ۲۰۱۱)

¹ Silica Fume

² Villena et al.

۲-۷-۲-۲- خاکستر بادی^۱

خاکستر بادی می‌تواند به عنوان یک ماده معدنی پرکننده در مخلوط‌هایی با خمیر سیمان کم، به منظور افزایش کارایی و تراکم بتن غلتکی استفاده شود. میزان خاکستر بادی معمولاً در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد حجم مواد سیمانی در نظر گرفته می‌شود (گرگوری و همکاران^۲، ۲۰۰۹).

این مواد در بتن غلتکی تا حدی جایگزین سیمان پرتلند بوده و میزان مصالح ریزدانه را بهینه می‌کند. علاوه بر این خاکستر بادی با توجه به خواص پوزولانی، مقاومت مخلوط را نیز بهبود می‌بخشد. هنگامی که به جای بخشی از سیمان استفاده شود، نیاز مخلوط‌های بتنی را به آب کاهش می‌دهد. مقدار بالای ریزدانه در بتن غلتکی، مقاومت مکانیکی را افزایش داده و بافت سطحی آن را بهبود می‌بخشد. به منظور افزایش میزان ذرات ریز، خاکستر بادی نیز می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از شن و ماسه استفاده شود استفاده از خاکستر بادی در بتن غلتکی راهکار مؤثری برای تأمین ذرات ریز مورد نیاز جهت تراکم کامل است (ویلنا و همکاران، ۲۰۱۱).

۲-۷-۲-۳- سرباره کوره^۳ و فسفر گچ^۴

این مواد معمولاً برای افزایش زمان گیرش بتن غلتکی به کار می‌رود. در نتیجه زمان ساخت و ساز را افزایش می‌دهد. بنابراین زمانی که فاصله حمل بتن غلتکی تا محل اجرا زیاد است می‌توان از این مواد استفاده کرد (ویلنا و همکاران، ۲۰۱۱).

¹ Fly Ash

² Gregory et al.

³ Blast furnace slag

⁴ Phospho-Gypsum

۲-۷-۴- روان کننده‌ها و کندگیر کننده‌ها

افزودنی‌های شیمیایی مانند روان کننده‌ها و کندگیر کننده‌ها کاربردهای محدودی در بتن غلتکی دارند و معمولاً در تحقیقات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تأثیر این مواد در ارتقا خواص بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی کمتر است چون این مواد، مقدار خمیر سیمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در بتن غلتکی مقدار خمیر سیمان نسبت به بتن معمولی کمتر است. عملکرد مواد روان کننده در کاهش مقدار آب مورد نیاز یک مخلوط بتن غلتکی تا حدودی وابسته به مقدار و نوع سنگ‌دانه‌های ریزتر از ۷۵ میکرومتر است. مقدار مواد کندگیر کننده بسته به واحد حجم بتن محاسبه می‌گردد و به صورت اسپری روی آن ریخته می‌شود. استفاده از مواد کندگیر کننده در درزهای طولی، استفاده از قالب در درزهای طولی لب به لب را منتفی می‌کند و باعث صرفه‌جویی ۳۰ درصدی در زمان ساخت و ۱۵ درصدی در هزینه کلی می‌شود (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۲-۷-۵- مواد هوازا

استفاده از مواد هوازا در مخلوط بتنی برای جلوگیری از خرابی ناشی از یخ‌زدگی امری متداول است. مواد افزودنی هوازا کاربرد عملی محدودی در مخلوط‌های بتن غلتکی داشته‌اند. تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده نشان داده است که در مخلوط‌های بتن غلتکی به خوبی می‌توان از مواد هوازا به میزان ۵ تا ۱۰ برابر بیش از مقداری که در بتن معمولی به کار می‌رود، استفاده نمود. البته عملی بودن تولید بتن غلتکی هوازایی شده در کارگاه تاکنون تجربه نشده است (ACI 325.10R, 2001).

۲-۷-۳- طرح اختلاط بتن غلتکی

منظور از طرح اختلاط بتن غلتکی، تعیین مقادیر اجزا بتن شامل درشت‌دانه (شن)، ریزدانه (ماسه)،

سیمان، مواد افزودنی معدنی (در صورت استفاده) و آب در واحد حجم بتن غلتکی است. انتخاب مقادیر اجزا باید به نحوی صورت گیرد که الزامات مورد نظر مکانیکی بتن سخت شده که عمدتاً به صورت مقاومت فشاری یا کششی و یا خمشی در سن یا سنین مشخص تعریف می‌گردند حاصل گردند و الزامات دوام نیز ارضا شوند. همچنین مخلوط باید با کارایی مناسب انجام گردد به نحوی که تراکم مطلوب آن با غلتک ارتعاشی میسر بوده و انسجام کافی مخلوط به نحوی فراهم آید که در حین عملیات اجرایی دچار جدایش نگردد. روش‌های مختلف توسط سازمان‌ها و مراجع جهت طرح اختلاط بتن غلتکی ارائه شده‌اند که در ادامه به دو روش رایج آن اشاره می‌شود.

۲-۷-۳-۱- روش‌های مهم طرح اختلاط بتن غلتکی

تاکنون روش‌های زیادی برای طرح اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم کرد:

- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های تراکم خاک (روش خاکی)
- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن (روش بتنی)

یک روش رایج برای طرح اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی روش تراکم خاک است. در این روش رابطه بین چگالی خشک (یا تر) نمونه با مقدار رطوبت آن تعیین می‌شود که از طریق تراکم نمونه‌ها با مقادیر رطوبت مختلف و تعیین چگالی آن‌ها انجام می‌شود. این کار مشابه روش‌های تراکم خاک است. تجهیزات و میزان انرژی تراکم برای تهیه نمونه‌های آزمایش رطوبت-چگالی در استاندارد ASTM D1557 آمده است.

مقدار مواد سیمانی بر اساس الزامات مقاومت و دوام مورد نظر در روسازی، تعیین می‌شود و غالباً به صورت درصدی از جرم کل مصالح خشک (سنگ‌دانه و مواد سیمانی) بیان می‌گردد. مقدار مواد سیمانی بین ۱۰ تا ۱۷ درصد جرم مصالح خشک در مخلوط‌های بتن غلتکی تغییر می‌کند، این مقدار برابر با ۲۰۸

تا ۳۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب است. ریزدانه و درشت‌دانه، به نحوی انتخاب می‌شوند که ترکیبی با دانه‌بندی مناسب ایجاد کنند. مقدار حجم ریزدانه و درشت‌دانه در واحد حجم بتن غلتکی پس از محاسبه مقدار رطوبت بهینه، تعیین می‌شود. مقدار بهینه رطوبت مخلوط، مقدار متناظر با نقطه پیک منحنی رطوبت-چگالی است که بستگی به خواص سنگ‌دانه‌های مصرفی و مقدار مواد سیمانی دارد. در مخلوطی که مقدار رطوبت آن کمتر از مقدار بهینه است، به دلیل ایجاد فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، مقاومت کاهش پیدا می‌کند. همچنین در صورتی که مقدار رطوبت بیشتر از مقدار بهینه باشد نیز به دلیل افزایش نسبت آب به مواد سیمانی ($w/c+p$) کاهش پیدا می‌کند (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸).

روش دیگر برای تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی روش روانی مطلوب است. روش‌های بتنی جهت دستیابی به مقاومت فشاری طرح (یا الزامات دوام) نسبت آب به مواد سیمانی مد نظر قرار می‌گیرد و همچنین اجزا مخلوط به گونه‌ای تعیین می‌شوند که کارایی مخلوط جهت تراکم با غلتک ویریه‌ای مناسب باشد. این کارایی بر پایه انجام آزمایش روانی به روش تعیین زمان لازم جهت تراکم نمونه تحت سربار و در حالت ارتعاشی (زمان وی بی اصلاح‌شده) تعیین می‌گردد. در روش‌های طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی، معمولاً کلیه پارامترهای مخلوط به غیر از یکی از آن‌ها مانند مقدار آب، مواد سیمانی یا مقدار سنگ‌دانه، ثابت نگه داشته شده و با انجام آزمایش‌های لازم، مقدار ماده متغیر تعیین می‌گردد تا روانی مناسب و سایر خواص مورد نظر تأمین گردد. بدین ترتیب مقدار بهینه هر یک از اجزای بتن به منظور دستیابی به خواص مورد نظر بتن غلتکی تازه و سخت شده، حاصل می‌شود. یکی از ملاحظات اساسی به هنگام استفاده از روش‌های طرح اختلاط انتخاب صحیح نسبت حجم خمیر به حجم ملات^۱ است. مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی باید دارای حجم خمیر کافی برای پر کردن فضای خالی بین ذرات سنگ‌دانه باشند. مقدار P_v قابلیت تراکم مخلوط و همچنین صافی نهایی سطح روسازی را تحت تأثیر قرار

^۱ Past Volume (P_v)

۲-۷-۳-۲- مراحل روش روانی مطلوب برای تعیین طرح اختلاط

روش مرحله به مرحله‌ی تعیین طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی از آیین‌نامه ACI 211.3R استخراج شده است. فهرست و علائم بکار رفته در مراحل طرح اختلاط در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

مرحله اول: نسبت‌های حجمی پوزولان به سیمان (p/c) و آب به مواد سیمانی ($w/c+p$) با توجه به الزامات طرح و به کمک شکل ۲-۸ برای تولید مخلوط‌های ملات و بتن انتخاب می‌گردد.

مرحله دوم: تعیین حداقل حجم خمیر (PT) با استفاده از مراحل زیر:

الف) از درصد $w/c+p$ تعیین شده در طرح اختلاط جهت ساخت خمیر سیمان استفاده می‌گردد و نمونه‌های ملات با مقادیر مختلف مقدار ریزدانه ساخته می‌شوند. سپس چگالی نمونه‌های ملات را که با روش‌های تراکم خاک‌ها مانند ASTM D1557 و یا ویبره ساخته شده‌اند، اندازه گرفته می‌شود.

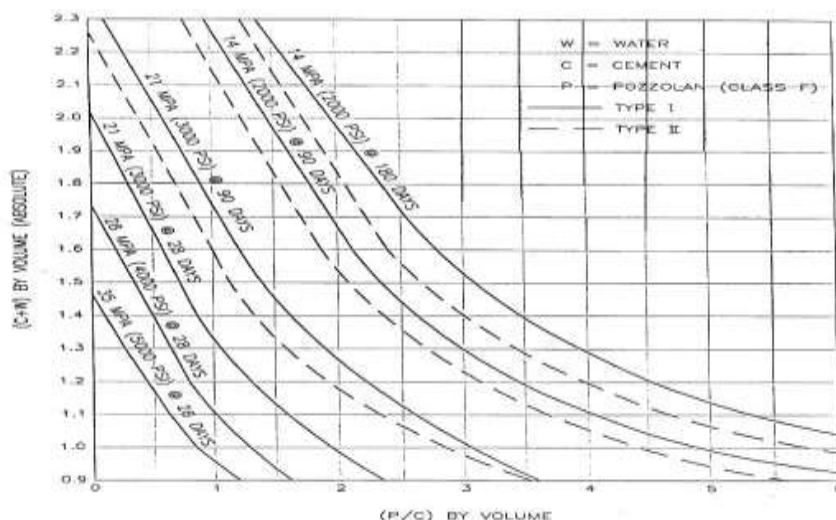
ب) نمودار چگالی ملات به ازای حجم‌های مختلف خمیر، رسم می‌گردد.

ج) حجم خمیر ملاتی که بیشترین چگالی را دارد تعیین می‌گردد.

در صورت عدم انجام آزمایش‌های گفته‌شده بالا، درصد حجم خمیر بدون هوا نسبت به حجم ملات بدون هوا (P_v)، بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۶ انتخاب می‌شود.

جدول ۱-۲ فهرست و علامت‌های روابط طرح اختلاط (ACI ۲۱۱.۳R, ۱۹۹۷)

نام پارامتر	علامت اختصاری
نسبت حجمی پوزولان به سیمان	p/c
مقدار حداقل خمیر مواد سیمانی (حجم)	PT
نسبت حجم خمیر بدون هوا به حجم ملات بدون هوا	P _v
حجم درشت‌دانه	VCA
حجم هوای داخل مخلوط	VA
حجم بتن	CV
حجم خمیر بدون هوا	VP
حجم کل ملات (ماسه + خمیر سیمان)	VMT
حجم ملات بدون هوا	V _m
حجم ریزدانه	VFA
حجم آب	VW
حجم سیمان	VC
حجم پوزولان	VF



شکل ۸-۲ رابطه بین مقاومت فشاری بتن غلتکی و نسبت آب به مواد سیمانی، به ازای نسبت‌های مختلف پوزولان به سیمان (ACI 211.3R, 1997)

مرحله سوم: تعیین حجم درشت‌دانه (VCA)

مقدار درشت‌دانه باید به گونه‌ای باشد که ضمن به حداقل رساندن مقدار ملات لازم در مخلوط، امکان تراکم مناسب و پر شدن منافذ خالی آن توسط ملات را فراهم آورد. فضای خالی بین ذرات درشت‌دانه و در نتیجه حجم خمیر لازم در بتن غلتکی بستگی به دانه‌بندی، شکل و اندازه حداکثر درشت‌دانه دارد. لذا توصیه بر این است که دانه‌بندی درشت‌دانه به سمت تراکم حداکثر تنظیم شود. در انتخاب مقدار مناسب درشت‌دانه، روش توصیه شده به این شکل است که نسبت‌های مختلف حجمی درشت‌دانه و ملات با یکدیگر ادغام‌شده و زمان وی بی اصلاح شده بتن غلتکی حاصله اندازه‌گیری گردد. بدیهی است نسبت‌های اجزای ملات یا به عبارتی طرح اختلاط ملات در کلیه مخلوط‌ها ثابت نگه داشته می‌شود و تنها حجم ملات نسبت به واحد حجم بتن تغییر داده می‌شود. مقدار مناسب درشت‌دانه مقداری است که مخلوطی با زمان وی بی‌مورد نظر پروژه به دست آید. در جدول ۲-۲ برای اندازه حداکثرهای مختلف درشت‌دانه، محدوده‌های درصد‌های حجمی توصیه شده ارائه شده‌اند که به عنوان نقطه شروع می‌توانند در تعیین مقدار بهینه درشت‌دانه مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ۲-۲ درصد حجمی درشت‌دانه در واحد حجم بتن (ACI ۲۱۱.۳R, ۱۹۹۷)

اندازه حداکثر سنگ‌دانه	۹/۵	۱۹	۳۸	۷۶	۱۱۴	۱۵۲
	میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر
حجم مطلق درشت‌دانه (%)	۴۲-۴۸	۴۶-۵۲	۵۲-۵۶	۵۷-۶۱	۶۱-۶۳	۶۳-۶۴

مرحله چهارم: مقدار هوای داخل بتن بین ۱ تا ۲ درصد حجم کل بتن در نظر گرفته می‌شود و مقدار

حجم هوای داخل مخلوط بتن با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$VA = CV \times (100 / \text{مقدار هوا}) \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

مرحله پنجم: محاسبه حجم خمیر سیمان VP (بدون هوا):

$$VP = \left(\frac{PT}{100} \times VMT \right) - VA \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

محاسبه حجم کل ملات (VMT):

$$VMT = CV - VCA \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

اگر برای محاسبه P_v مطابق روش دوم در مرحله دوم، مقداری انتخاب شود، می‌توان حجم خمیر

سیمان را از فرمول زیر به دست آورد:

$$VP = VM \times VP \quad \text{رابطه (۴-۲)}$$

محاسبه حجم ملات بدون هوا (VM):

$$VM = CV - VCA - VA \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

مرحله ششم: تعیین حجم ریزدانه (VFA):

$$VFA = CV - VCA - VP - VA \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

یا

$$VFA = VM (1 - PV) \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

مرحله هفتم: تعیین حجم آب (VW)

$$VW = VP \times \frac{\frac{W}{C+P}}{1 + \frac{W}{C+P}} \quad \text{رابطه (۸-۲)}$$

مرحله هشتم: تعیین حجم سیمان

$$VC = \frac{VW}{\frac{W}{C+P}(1+\frac{P}{C})} \quad \text{رابطه (۹-۲)}$$

مرحله نهم: تعیین حجم پوزولان (VP)

$$VP = VC \times \left(\frac{P}{C}\right) \quad \text{رابطه (۱۰-۲)}$$

مرحله دهم: محاسبه جرم مصالح با ضرب نمودن حجم آن‌ها در جرم حجمی هر کدام.

مرحله یازدهم: انجام آزمایش‌های روانی برای دستیابی به زمان وی بی اصلاح‌شده موردنظر و یا

تعیین کمترین زمان وی بی برای رسیدن به بیشترین تراکم.

مرحله دوازدهم: بعد از انتخاب نهایی حجم سنگ‌دانه‌ها، لازم است حداقل دو اختلاط آزمایشی یکی

با $\frac{W}{C+P}$ بیشتر و یکی با $\frac{W}{C+P}$ کمتر از مقدار تعیین شده ساخته شود. آنگاه نمودار مقاومت به ازای $\frac{W}{C+P}$ را

رسم و نسبت‌های نهایی اختلاط تعیین می‌گردد.

۲-۸- مصالح بازیافتی جایگزین سنگ‌دانه در روسازی بتنی

معمولی و روسازی بتن غلتکی

۲-۸-۱- خرده لاستیک

با توجه به رشد حمل و نقل زمینی و افزایش تعداد خودروها، تولید لاستیک افزایش یافته است. به همین نسبت استهلاک و فرسودگی لاستیک خودروها نیز بیشتر شده است. مسئله‌ی بازیافت این ضایعات به امری مهم تبدیل شده که مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از راه‌هایی که می‌توان این ضایعات را بازیافت کرد، استفاده از آن‌ها به عنوان سنگ‌دانه در مخلوط روسازی بتن غلتکی است. استفاده از خرده لاستیک در درصد‌های مختلف و بررسی عملکرد روسازی بتنی با این مواد بازیافتی، می‌تواند نقش مهمی در حفظ محیط‌زیست داشته باشد. تحقیق انجام شده توسط فخری و صابری، پودر لاستیک با درصد‌های ۵ و ۱۰ و ۳۵ جایگزین ریزدانه شده و نیز در برخی از نمونه‌ها علاوه بر این جایگزینی، سیلیکا فوم جایگزین درصدی از سیمان شده است. آزمایش‌ها نشان داد که تنها در نمونه‌های ۵ و ۱۰ درصدی شامل پودر لاستیک و فاقد سیلیکا فوم بودند، افزایش مقاومت فشاری را شاهد بودیم ولی نمونه‌های ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزینی پودر لاستیک و سیلیکا فوم نیز افزایش مقاومت فشاری داشتند. مقاومت خمشی نمونه‌های ۵ درصدی پودر لاستیک با سیلیکا فوم و بدون سیلیکا فوم بودند نیز افزایش یافت. در نتیجه استفاده از پودر لاستیک به عنوان ریزدانه علاوه بر اینکه در بهبود شرایط زیست‌محیطی نقش دارد سبب بهبود خواص روسازی بتن غلتکی می‌گردد (فخری و صابری^۱، ۲۰۱۶).

استفاده از لاستیک بازیافتی در روسازی بتن غلتکی، از لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی بسیار مفید است. با جایگزینی درصد‌های مختلف سنگ‌دانه با لاستیک خرد شده در مخلوط روسازی بتن غلتکی،

^۱ Fakhri & Saberi

می‌توان در حفظ محیط‌زیست و کاهش هزینه‌های ساخت نقش مهمی داشت. آزمایش‌هایی که توسط مداح و همکاران^۱ (۲۰۱۴) انجام شد، نشان داد بعد از جایگزینی لاستیک، ویژگی‌هایی چون وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری تغییر می‌کند. مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی با اضافه کردن لاستیک بازیافتی کاهش یافته است و هرچه درصد لاستیک در مخلوط افزایش یافت، افت مقاومت نیز بیشتر شده است. بیشترین میزان افت مقاومت فشاری برای حالت ۳۰ درصد جایگزینی لاستیک بود که مقاومت فشاری نسبت به نمونه عادی با سنگ‌دانه طبیعی ۵۰ درصد کاهش یافت. بنابراین با در نظر گرفتن حداقل مقاومت فشاری در آیین‌نامه روسازی بتن غلتکی، بعد از این جایگزینی مخلوط روسازی بتنی حاصل برای ترافیک سبک، راه‌های روستایی و پیاده‌رو مناسب ارزیابی شد. از مزایای استفاده از این ماده بازیافتی می‌توان به کاهش زمان تراکم تا ۳۰ درصد اشاره کرد که خود سبب کاهش زمان غلتک زدن می‌شود.

در تحقیق دیگری برای تولید بتن سبک‌تر از جایگزینی خرده لاستیک بازیافتی با سنگ‌دانه‌های طبیعی استفاده شده است. ۱۰ طرح اختلاط با درصدهای مختلف لاستیک و ۱ طرح بتن با سنگ‌دانه طبیعی ساخته شده است تا ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی بتن مقایسه شود. جایگزینی‌ها از ۱۰ تا ۱۰۰ درصد انجام شد. در اینجا نیز جایگزینی لاستیک چگالی و ویژگی‌های مکانیکی بتن را کاهش داد. مدول الاستیسته از ۲۴/۱ گیگاپاسکال برای نمونه با سنگ‌دانه طبیعی به ۶/۳ گیگاپاسکال برای ۱۰۰ درصد جایگزینی لاستیک کاهش یافت. این تحقیق نشان داد در بتن‌های سبک می‌توان خرده لاستیک‌ها را در بتن استفاده کرد (لو و همکاران^۲، ۲۰۱۵).

علاوه بر بررسی ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های بتنی شامل لاستیک بازیافتی و بتن بازیافتی،

¹ Meddah et al.

² Lv et al.

تحقیقاتی در زمینه‌ی بررسی ویژگی‌های خستگی این مخلوط‌ها انجام شده است. یکی از این تحقیقات در واقع به بررسی تأثیر استفاده از لاستیک بازیافتی و سنگ‌دانه بتن بازیافتی در روسازی بتنی فرودگاه می‌پردازد. در این تحقیق علاوه بر خستگی، ویژگی‌های مکانیکی نیز مورد بررسی قرار گرفت. خرده لاستیک با درصدهای ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصد با سنگ‌دانه در مخلوط روسازی بتنی جایگزین شد. نتایج به صورتی که استفاده از این دو ماده بازیافتی با هم، سبب افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری مخلوط روسازی بتنی شد. هر چه مقدار لاستیک افزایش یافت، مقدار مقاومت‌های فشاری و خمشی و مدول الاستیسیته کاهش پیدا کرد. با توجه به حداقل مقاومت فشاری تعیین‌شده در آیین‌نامه برای روسازی بتنی فرودگاه، حداکثر جایگزینی مجاز ضایعات لاستیک ۲۰ درصد محاسبه شد. عمر خستگی نیز بعد از استفاده بتن بازیافتی و لاستیک بازیافتی افزایش یافت و مقدار بهینه آن نیز مربوط به همان نمونه ۲۰ درصدی بود. ادامه تحقیقات در این زمینه نشان داد علاوه بر استفاده این مواد بازیافتی در روسازی فرودگاه، می‌توان آن‌ها را در سایر روسازی‌های بتنی نیز استفاده کرد. این مواد مقاومت فشاری، کششی و خمشی را کاهش و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند (فنگ و همکاران^۱، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران^۲، ۲۰۱۶)

۲-۸-۲- خرده بتن

استفاده از بتن بازیافتی راه به عنوان سنگ‌دانه در بتن غلتکی نیز می‌تواند به محیط زیست کمک کند. مدیریت ساخت و ساز مواد دورریختنی از مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی برای جامعه امروز ماست. سالانه بیشتر از ۹ میلیون تن مواد تخریبی حاصل از ساخت و ساز تنها در والونیا در منطقه جنوبی بلژیک تولید می‌شود. از این میان خرده بتن می‌تواند جایگزین سنگ‌دانه‌های طبیعی در بتن غلتکی شود. ویژگی‌هایی مانند سایش لس‌آنجلس و درصد جذب آب و وزن مخصوص سنگ‌دانه‌های بازیافتی مناسب

¹ Feng et al.

² Li et al.

ارزیابی شد. در طراحی مخلوط بتن غلتکی در ترکیب با خرده بتن، هدف اصلی بهینه کردن تراکم برای به دست آوردن یک مخلوط مقاوم و بادوام است. روش طراحی مخلوط شامل آزمون‌های سازگاری بتن، روش تراکم خاک و روش حجم بهینه خمیر سیمان است. این روش‌ها بر اساس به حداقل رساندن مقدار سیمان با توجه به میزان آب و سنگ‌دانه است که بر اساس مؤلفه‌های تراکم همانند آزمون‌های تراکم خاک است. با جایگزین کردن سنگ‌دانه و بتن بازیافتی، مقاومت فشاری بتن غلتکی کاهش یافت اما این تحقیق فرصت استفاده از بتن بازیافتی در بتن غلتکی را بیان می‌کند (کوارد و همکاران^۱، ۲۰۱۰).

۲-۸-۳- خرده آسفالت بازیافتی (RAP)^۲

در بعضی از کشورها، به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی، آسفالت بازیافتی حاصل از روسازی‌های قدیمی، مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرد. در الجزایر مخصوصاً به دلیل حجم زیاد سالیانه این ضایعات، اهمیت پیدا کرده است. یکی از راه‌های بازیافت و استفاده مجدد ضایعات روسازی‌های آسفالتی، استفاده آن‌ها به عنوان سنگ‌دانه، در مخلوط روسازی بتن غلتکی است. با توجه به اندازه‌های مختلف خرده آسفالت می‌توان از آن‌ها به عنوان جایگزین درشت‌دانه و ریزدانه در روسازی بتن غلتکی استفاده کرد. پس از جایگزینی سنگ‌دانه طبیعی و آسفالت بازیافتی و بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوام روسازی بتن غلتکی، آزمایش‌ها نشان داد می‌توان ۵۰ درصد این سنگ‌دانه‌ها را جایگزین نمود و روسازی نسبتاً مطلوب باقی می‌ماند. علاوه بر این با این کار قسمت زیادی از ضایعات آسفالت مورد استفاده مجدد قرار گرفته است و از جهت زیست‌محیطی بسیار مطلوب است (ستاری و همکاران^۳، ۲۰۱۵).

تحقیقی توسط مدرس و حسینی^۴ (۲۰۱۴) در زمینه‌ی استفاده از خرده آسفالت و خاکستر پسته برنج

¹ Courard et al.

² Recycle Asphalt Pavemet

³ Settari et al.

⁴ Modarres & Hosseini

در روسازی بتن غلتکی انجام شده است. آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از خاکستر پسته برنج به عنوان ۳ درصد حجمی سیمان در مدت طولانی سبب افزایش مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی می‌شود و نیز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ناشی از ترمیم روسازی‌های آسفالتی به عنوان ریزدانه و درشت‌دانه سبب افت مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی گردید. ولی با توجه به در دسترس بودن این مصالح سنگی در راه‌ها و استفاده مجدد از مواد بازیافتی برای محافظت از محیط زیست، استفاده از آن در مسیرهای کم تردد توجیه پیدا کرده است.

در پژوهش دیگری که کریمی و حسنی (۱۳۹۰) در رابطه با استفاده از خرده آسفالت در بتن غلتکی انجام داد نتایج ذیل به دست آمد. در این پژوهش روانی مخلوط‌ها، پیش‌بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت و حساسیت حرارتی بررسی شده است.

- استفاده از خرده آسفالت تأثیر چندانی بر روانی و میزان آب مورد نیاز مخلوط بتن غلتکی ندارد و تقریباً زمان وی بی ثابت است. هرچند که در درصدهای بالای استفاده، مقداری کاهش در زمان وی بی و افزایش روانی مشهود است. از این رو می‌توان تا حدی مقدار آب مخلوط را کاهش داده که خود عملی در افزایش مقاومت مخلوط‌های بتنی است.
- روابطی جهت پیش‌بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی ارائه شد. مقادیر درصد مجاز جایگزینی استفاده از خرده آسفالت وابسته به مقاومت طراحی مخلوط مبنا است و تشکیل معادلات رگرسیونی و تعیین درصد مجاز استفاده علاوه بر اینکه درصدهای قابل توجهی برای جایگزینی را توجیه می‌کند، بستر مناسبی را برای توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی بین این نوع جایگزینی در پروژه‌های راهسازی فراهم می‌آورد.

- مخلوط بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت به رسم سایر مخلوط‌های حاوی مواد قیری در مقابل تغییرات دما و به ویژه افزایش دما حساس است و در اثر افزایش دما و در نتیجه افزایش روانی قیر، مقاومت فشاری مخلوط بیش از حد معمول مخلوط‌های بتن غلتکی کاهش می‌یابد.

۲-۸-۴- سرباره کوره و ضایعات شیشه

ضایعات شیشه یکی دیگر از مواد بازیافتی است که به صورت سنگ‌دانه در بتن استفاده شده است. تحقیقی در زمینه‌ی استفاده از ضایعات شیشه و سرباره فولاد در استرالیا انجام شد که در آن ضایعات شیشه و سرباره فولاد جایگزین سنگ‌دانه‌های آهکی مخلوط بتنی شدند. آزمایش‌ها نشان داد حتی می‌توان تمام سنگ‌دانه‌های طبیعی را با شیشه و سرباره فولاد جایگزین کرد. جایگزین کردن شیشه سبب افزایش کارایی و کاهش چگالی بتن شد. زمانی که سرباره فولاد جایگزین شد، مقاومت فشاری و خمشی و مدول الاستیسیته و چگالی بتن افزایش یافت و با جایگزینی تا ۱۷/۵ درصد شیشه به عنوان درشت‌دانه، تأثیر بسیار کمی بر ویژگی‌های مکانیکی بتن داشت (یو و همکاران^۱، ۲۰۱۶). در تحقیقی که در زمینه‌ی استفاده از ضایعات پودر شیشه در بتن انجام شده است، نتایج نشان داده است که پودر شیشه با توجه به ترکیباتی که دارد در بتن فعالیت‌های پوزولانی انجام می‌دهد. پودر شیشه با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ وزنی جایگزین سیمان در مخلوط بتن گردید. به دلیل خاصیت پوزولانی پودر شیشه زمان‌گیرش بتن کاهش پیدا کرد و زمانی که ۱۰ درصد پودر شیشه را جایگزین سیمان کردند مقاومت فشاری بتن ۹ درصد افزایش یافت و با افزایش درصد شیشه تا ۱۵ درصد، ویژگی‌های مکانیکی بتن بهبود می‌یافت به گونه‌ای که با جایگزینی ۱۵ درصد پودر شیشه به جای سیمان، مقاومت فشاری بتن ۱۶ درصد افزایش

^۱ Yu et al.

پیدا کرد (علی عبدو و همکاران^۱، ۲۰۱۶).

عامری و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی تأثیر سرباره کوره ذوب آهن اصفهان بر مخلوط بتن غلتکی پرداخته‌اند. در این پژوهش از سه عیار مختلف سیمان ۲۰۰ و ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. سرباره نیز با درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزینی بجای سنگ‌دانه‌های طبیعی بتن غلتکی بکار گرفته شد. برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه‌ای استفاده شد. حداقل مقاومت فشاری مطابق ACI 325.10R برابر ۲۷/۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. مطابق نتایج آزمون مقاومت فشاری، جایگزینی ۲۵٪ این مواد باعث بهبود خواص مقاومتی این مخلوط شده و افزایش بیشتر در درصد جایگزینی سرباره باعث کاهش مقاومت گردید. شیب نمودار بعد از مقدار ۲۵٪ روند نزولی به خود گرفت تا در درصد بیش از ۷۵٪ این روند نزولی شدت یافت. همچنین با توجه به قیمت ارزان‌تر سرباره نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی، استفاده از سرباره باعث کاهش هزینه‌های ساخت شده و قیمت تمام شده پروژه را کاهش می‌دهد.

۲-۸-۵- مواد پلاستیکی (پلی اتیلن)

یکی از معایب روسازی‌های صلب، انعطاف‌پذیری کم آن‌ها است. این امر سبب ایجاد ترک در اثر نیروهای کششی و خمشی می‌شود. با استفاده مجدد از برخی ضایعات صنایع مانند لاستیک خرد شده و بطری‌های پلاستیکی خردشده (polypropylene, PP) به‌عنوان سنگ‌دانه (درشت‌دانه و ریزدانه) می‌توان انعطاف‌پذیری روسازی بتنی را افزایش داد. در این تحقیق سنگ‌دانه‌های مخلوط روسازی بتنی در درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ با خرده لاستیک و بطری‌های پلاستیکی خردشده جایگزین شد. نتایج آزمایش‌ها به صورتی بود که بهترین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به درصدهای جایگزینی

^۱ Aliabdo et al.

۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بود. این تحقیق نشان داد با استفاده از مواد بازیافتی می‌توان علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به بهبود ویژگی‌های روسازی بتنی از جمله مقاومت کششی غیرمستقیم نیز کمک کرد (کریشنامورثی و همکاران^۱، ۲۰۱۶).

در تحقیق دیگری که توسط سیلوا و همکاران^۲ (۲۰۱۲) انجام شده است، دوام بتن بعد از جایگزینی ضایعات پلاستیکی (polyethylene terephthalate) به‌عنوان سنگ‌دانه طبیعی در مخلوط‌های بتنی، بررسی شده است. در این تحقیق ضایعات پلاستیکی با درصدهای ۷/۵ و ۱۵ جایگزین سنگ‌دانه مخلوط بتن شد. تأثیر استفاده این ضایعات به عنوان درشت‌دانه و ریزدانه مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌هایی مانند انقباض و جذب آب روی این نمونه‌ها انجام شد. در نهایت آزمایش‌ها نشان داد دوام نمونه‌های حاوی ضایعات پلاستیکی نسبت به نمونه‌های عادی بتنی کاهش می‌یابد.

تحقیق دیگری نیز توسط منجوناث^۳ (۲۰۱۶) با جایگزینی ضایعات پلاستیکی وسایل الکترونیکی (E plastic) به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن، برای بهبود برخی ویژگی‌های آن انجام شده است. امروزه ضایعات E-plastic در حال افزایش است و از ضایعات مربوط به صنایع IT است که از تلویزیون و یخچال و کامپیوترهای قدیمی دور ریخته می‌شود. این نوع پلاستیک تجزیه ناپذیر است و نرخ بسیار پایین بازیافت را دارد. به همین دلیل با استفاده آن به عنوان سنگ‌دانه ریز و درشت می‌توان کمک بزرگی به بازیافت آن کرد. این ماده در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین ریزدانه و درشت‌دانه شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و خمشی روی بتن با این ماده و بدون این ماده انجام شد و نتایج نشان داد استفاده از ضایعات E-plastic به‌عنوان سنگ‌دانه، سبب کاهش چگالی و مقاومت فشاری و کششی بتن شد. استفاده ۱۰ درصدی آن سبب افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن شده و نیز شکل‌پذیری بتن را افزایش داده است.

¹ Krishnamoorthya et al.

² Silva et al.

³ Manjunath

فصل سوم

مصالح مصرفی، طرح اختلاط و روش انجام

آزمایش‌ها

۳- مصالح مصرفی، طرح اختلاط و روش انجام

آزمایش‌ها

۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده شامل سیمان پرتلند تیپ II، درشت‌دانه شکسته پایه آهکی و ماسه کوهی و ضایعات XLPE بازیافتی و آب آشامیدنی بوده است.

۳-۱-۱- سنگ‌دانه‌ها

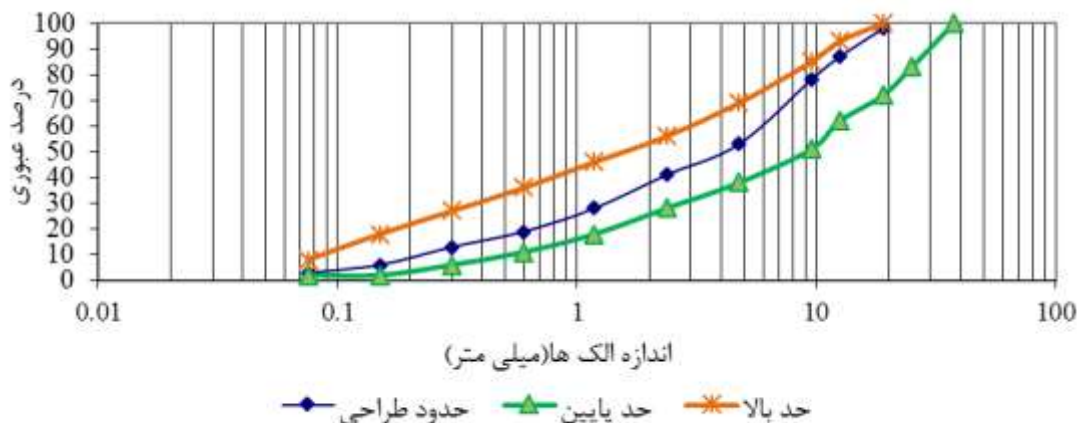
دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها مطابق استاندارد روسازی بتن غلتکی انجام شده است. ابتدا با استفاده از الک درشت‌دانه‌های پایه آهکی با سه اندازه عبوری از الک ۳/۴ اینچ (۱۹ میلی‌متر)، ۱/۲ اینچ (۱۴ میلی‌متر) و ۳/۸ اینچ (۱۰ میلی‌متر) جدا شده‌اند. سپس به نسبت جدول ۳-۱ که در بخش دانه‌بندی در ادامه خواهد آمد با هم ترکیب شده‌اند. پس از آن آزمایش دانه‌بندی با لرزاننده بر روی ریزدانه‌های کوهی انجام شد. بر طبق نتایج، این دانه‌بندی منطبق بر دانه‌بندی مورد نیاز برای مخلوط‌های بتن غلتکی بوده است. درشت‌دانه پایه آهکی از معدنی در ۲۰ کیلومتری شهرستان شاهرود و ریزدانه کوهی از معدنی در ۵ کیلومتری شهرستان میامی استان سمنان تهیه شده است. ضایعات XLPE به وسیله دستگاه بازیافت پلاستیک در اندازه مناسب خرد شده است. اندازه این مواد مانده روی الک شماره ۴ (۴/۷۵mm) و عبوری از الک ۳/۸in (۱۰mm) است. شکل ۳-۱ ضایعات XLPE در اندازه مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ ضایعات XLPE در شکل و اندازه مورد استفاده

۳-۱-۱-۱- دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

یکی از فاکتورهای مهم و تعیین‌کننده و مؤثر در کیفیت و اقتصادی بودن بتن، انتخاب دانه‌بندی مناسب برای مصالح است. مصالح دانه‌بندی شامل درشت‌دانه و ریزدانه است. در دانه‌بندی باید توجه کرد که حداکثر اندازه اسمی مصالح مطابق آیین‌نامه ACI 325.10R برابر ۱۹ میلی‌متر بوده است. در این پایان‌نامه از محدوده دانه‌بندی پیشنهادی در پیوست ۳ آیین‌نامه ACI 211.3R استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی در شکل ۳-۲ و مقادیر مربوط به آن در جدول ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲ منحنی دانه‌بندی مورد استفاده

جدول ۱-۳ دانه بندی مورد استفاده (ACI ۲۱۱.۳R, ۱۹۹۷)

درصد تجمعی عبوری از الک	اندازه بر حسب اینچ (نام الک)
۱۰۰	۱
۸۳-۱۰۰	۳/۴
۷۲-۹۳	۱/۲
۶۶-۸۵	۳/۸
۵۱-۶۹	الک ۴
۳۸-۵۶	الک ۸
۲۸-۴۶	الک ۱۶
۱۸-۳۶	الک ۳۰
۱۱-۲۷	الک ۵۰
۶-۱۸	الک ۱۰۰
۲-۸	الک ۲۰۰

۳-۱-۱-۲- وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت دانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت دانه و از استاندارد ASTM C127 استفاده شده است. از این روش آزمایش می توان وزن مخصوص، وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع^۱، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ دانه ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، سبد سیمی

^۱ SSD

با سوراخ‌های ۳/۳۵ میلی‌متری یا ریزتر، مخزن آب و الک‌های استاندارد است. روش انجام آزمایش به صورتی است که ابتدا نمونه‌ها را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک کرده، سپس آن را برای ۱ تا ۳ ساعت در دمای محیط قرار داده تا خنک شود. سپس سنگ‌دانه‌ها برای ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها را از آب بیرون آورده و روی یکپارچه جاذب رطوبت پهن کرده تا لایه سطحی آب رو سنگ‌دانه‌ها از بین برود. وزن نمونه را که در حالت اشباع با سطح خشک، اندازه‌گیری کرده و بلافاصله پس از تعیین وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا، نمونه را درون سبد سیمی قرار داده و وزن ظاهری آن در آب ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت می‌شود. سپس نمونه را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک نموده و ۱ تا ۳ ساعت در هوای محیط خنک می‌شود. در پایان وزن خشک نیز ثبت می‌شود. با داشتن ۳ وزن ذکرشده، با استفاده روابط موجود در استاندارد ASTM C127 وزن مخصوص‌ها و درصد جذب آب به دست می‌آید.

۳-۱-۱-۳- وزن مخصوص و درصد جذب آب ریزدانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب ریزدانه از استاندارد ASTM C128 استفاده شده است. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص، وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، پیکنومتر، قالب مخروطی ناقص و میله متراکم کننده مخصوص و دستگاه دمنده هوای گرم است. در روش انجام آزمایش ابتدا نمونه در یک ظرف مناسب تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده است. پس از سرد شدن نمونه، سنگ‌دانه‌های ریز به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور قرار داده شده‌اند. در ادامه آب اضافی روی سنگ‌دانه‌ها به‌طوری‌که ریزدانه‌ها بیرون ریخته نشوند، تخلیه می‌شود. نمونه را روی یک سطح صاف و غیر جاذب پهن و صاف‌کرده و در معرض جریان هوای گرم قرار داده می‌شود. این کار تا

زمانی که نمونه اشباع با سطح خشک می‌رسد ادامه می‌یابد. برای اطلاع از وضعیت اشباع با سطح خشک، مخروط قالب رو یک سطح صاف و غیر جاذب رطوبت از طرف قطر بزرگ قرار داده می‌شود. قسمتی از ریزدانه‌ها را به صورت سست داخل مخروط ریخته تا از مخروط سرریز کند. سنگ‌دانه‌های ریز به آرامی با ۲۵ ضربه درون قالب مورد تراکم قرار داده می‌شود. برای هر ضربه میله تقریباً از فاصله ۵ میلی‌متری روی سنگ‌دانه‌ها رها می‌شود. ماسه سست از روی قالب کنار زده شده و قالب به صورت عمودی بالا کشیده می‌شود. اگر سنگ‌دانه‌ها رطوبت سطحی داشته باشند به شکل قالب مانده و چنانچه ریزش کمی داشته باشند، یعنی ریزدانه به حالت اشباع با سطح خشک رسیده است. در ادامه قسمتی از پیکنومتر را با آب پر کرده و مقدار ۵۰۰ گرم از ریزدانه اشباع با سطح خشک را درون آن ریخته و با افزودن آب پیکنومتر تا ۹۰ درصد حجم آن پر می‌شود. سپس پیکنومتر به صورت دستی تکان داده شده و ۲۰ دقیقه منتظر مانده تا حباب‌ها خارج شود و تا خط نشانه پر می‌شود. وزن نمونه حاوی آب و ریزدانه ثبت می‌شود. سپس سنگ‌دانه‌های ریز را از پیکنومتر خارج کرده و در دمای ۱۱۰ درجه خشک می‌شوند. پس از سرد شدن نمونه وزن خشک ریزدانه‌ها نیز ثبت می‌شود. وزن پیکنومتر با آب نیز ثبت می‌شود. با داشتن وزن‌های ذکر شده و با استفاده از روابط استاندارد ASTM C128 وزن مخصوص‌های مورد نیاز و درصد جذب آب ریزدانه‌ها به دست می‌آید.

۳-۱-۴- سایش لس آنجلس

در این آزمایش مقاومت سایشی سنگ‌دانه‌های معدنی با دانه‌بندی استاندارد در برابر سایش و ضربه در یک استوانه‌ی فولادی مدور که دارای چند گوی فولادی است، تعیین می‌گردد. تعداد گوی‌ها به دانه‌بندی سنگ‌دانه مورد آزمایش بستگی دارد. هنگامی که استوانه می‌چرخد، لبه‌های فولادی، نمونه و گوی‌های فولادی را بالابرده شده و از آنجا رها می‌شوند. ضربه وارده باعث شکستن و سایش می‌گردد. سپس محتویات درون استوانه، ساییده شده و غلتیده می‌شود تا دوباره با لبه فولادی برخورد کند و این چرخه

مجدداً تکرار می‌گردد. بعد از چرخش تعداد دور مشخص استوانه، محتویات درون استوانه را خارج نموده و سنگ‌دانه‌ها الک می‌شوند تا افت وزنی نمونه تحت سایش به دست آید. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C131 انجام شده است. بر اساس این استاندارد نمونه و گوی‌ها درون دستگاه ریخته شده و دستگاه برای ۵۰۰ دور کامل با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه تنظیم می‌شود. بعد از اتمام چرخش دستگاه مصالح را خارج نموده روی الک نمره ۱۲ (۱/۷ میلی‌متر) ریخته و الک می‌شود. مصالح مانده روی این الک شسته شده و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند. با توجه به وزن اولیه و وزن نمونه خشک شده، میزان سایش لس‌آنجلس به دست می‌آید.

۳-۱-۱-۵- ارزش ماسه‌ای

آزمایش ارزش ماسه‌ای، آزمایشی سریع برای تعیین نسبت ریزدانه یا همان مصالح رسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع هدف از این آزمایش، تعیین نسبت حجم ماسه به کل حجم خاک است. دانه‌های تشکیل دهنده بتن باید کاملاً تمیز باشند یعنی گل و لای آن در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه باشد. برای تعیین تمیزی ماسه از آزمایش هم‌ارز ماسه مطابق با استاندارد ASTM D2419 استفاده شده است. ابتدا ۱۰۰ gr ماسه عبوری از الک شماره ۴ به روش ۴ قسمتی از دیوی ماسه جدا می‌شود. استوانه مدرج تا ۴ اینچ با مایع استوکس^۱ پر شده و بعد از آن ۱۰۰ gr ماسه به آرامی داخل استوانه پر از مایع ریخته می‌شود. بعد از ۱۰ دقیقه (زمان برای ته‌نشین شدن) استوانه ۹۰ بار تکان داده می‌شود و سپس تا ارتفاع ۱۵ اینچ با مایع استوکس می‌شود. دقت شود در موقع تکان دادن استوانه، قسمت بالایی استوانه به وسیله درپوش مناسب بسته شده تا از بیرون ریختن ماسه و مایع استوکس جلوگیری شود. بعد از این مرحله به مدت ۲۰ دقیقه منتظر مانده تا مواد مجدداً ته‌نشین شود بعد از ته‌نشین شدن، ۲ لایه در قسمت پایین استوانه ایجاد می‌شود. لایه بالایی لای و رس و لایه‌ی پایینی ماسه است. با استفاده از روابط موجود در استاندارد ذکر

^۱ Stocks Liquid

شده ارزش ماسه‌ای محاسبه می‌شود.

۳-۱-۱-۶- مدول نرمی ماسه

برای تعیین مدول نرمی ماسه ابتدا از نمونه و دپوی تعیین شده نمونه برداری کرده و به روش ۴ قسمتی نمونه موردنظر آزمایش جدا می‌شود. بهتر است مقدار ماسه‌ای که از دپو برداشته می‌شود از چند قسمت دپو باشد تا نسبتاً یکنواخت باشد و دانه‌بندی آن متنوع باشد. نمونه‌ای ۴ قسمتی به دست آمده را در دمای ۱۱۰ درجه قرار داده تا سطح آن خشک شود. مقدار ۱۰۰۰g ماسه از نمونه جدا می‌شود و سپس الک‌های ۳/۸ اینچ، #۴، #۸، #۱۶، #۳۰، #۵۰، #۱۰۰ وزن می‌شود و به ترتیب روی هم قرار داده می‌شوند. وقتی دانه‌ها خشک شدند آن‌ها را روی الک‌ها ریخته و الک می‌شوند. بعد از الک کردن ماسه، الک‌ها را با ماسه باقی مانده روی آن‌ها وزن می‌کنیم. سپس مدول نرمی از تقسیم درصد مانده روی الک‌های ذکر شده بر ۱۰۰ به دست می‌آید. این روش مطابق با استاندارد ASTM C33 انجام شده است.

در جدول ۲-۳ مشخصات فنی سنگ‌دانه‌ها و ضایعات عایق کابل فشار قوی^۱ آزمایش شده در این تحقیق، نشان داده شده است.

^۱ Waste XLPE

جدول ۲-۳ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ‌دانه‌ها و عایق کابل فشار قوی

نام استاندارد	ضایعات XLPE	درشت‌دانه (اندازه الک)			ماسه	ویژگی‌ها
		۳/۴in	۱/۲in	۳/۸in		
ASTM C127 (درشت‌دانه) ASTM C128 (ریزدانه)	۸۰۰	۲۶۴۲	۲۶۶۰	۲۶۸۶	۲۶۰۰	وزن مخصوص (kg/m ³)
ASTM D2419	-	-	-	-	۷۷	ارزش ماسه‌ای
ASTM C33	-	-	-	-	۲/۹	مدول نرمی
ASTM C127 (درشت‌دانه) ASTM C128 (ریزدانه)	۰	۰/۵۵	۰/۳۳	۰/۷	۲/۲	درصد جذب آب (%)
ASTM C131	-	۲۱	۲۱	۲۳	-	مقاومت لس آنجلس (%)

۳-۱-۲- سیمان

در مخلوط روسازی بتن غلتکی، مقدار مواد سیمانی توصیه شده حدود ۱۲ تا ۱۶ درصد جرم سنگدانه‌ها است. (ACI 325.10R, 2001; PCA, 2010). در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ II شاهرود استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها به ترتیب در جدول ۳-۳ و ۳-۴ نشان داده شده است. سیمان تیپ II به عنوان سیمان پرتلند اصلاح شده، مصرف ویژه آن در ساخت بتن‌هایی است که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله سولفات‌ها به آنها در حد متوسط باشد. از این سیمان به دلیل پایین بودن گرمای حاصل از ترکیب آن با آب، در بتن ریزی‌های نیمه حجیم و فوندانسیون‌های نسبتاً بزرگ استفاده می‌شود.

جدول ۳-۳ مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ II شاهرود

مشخصات فیزیکی	
وزن مخصوص (kg/m^3)	۳۱۵۰
نرمی (cm^2/gr)	۳۳۰۹
انبساط %	۰/۰۳۹
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۴۰
زمان گیرش نهایی (ساعت: دقیقه)	۳:۳۰
مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm^2)	۲۷۵
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	۳۷۲
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)	۴۶۹

جدول ۳-۴ مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II شاهرود

مشخصات شیمیایی	
۶۳/۳۶	کلسیم هیدروکسید (CaO) %
۲۱/۲۰	دی اکسید سیلیسیم (SiO ₂) %
۴/۴۸	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) %
۳/۹۶	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃) %
۱/۵۲	اکسید منیزیم (MgO) %
۲/۵۰	تری اکسید گوگرد (SO ₃) %
۰/۳۷	%Na ₂ O
۱/۱۸	%L.O.I

۳-۱-۳ آب

آب مصرفی، آب آشامیدنی معمولی فاقد هر گونه افزودنی بوده است.

۳-۲- آزمایش‌ها و روش‌های انجام

۳-۲-۱- آماده‌سازی ضایعات عایق کابل های فشار قوی

ضایعات XLPE از محل نگهداری ضایعات این ماده، در کارخانه کابل مغان شاهرود تهیه شده است. XLPE چون به عنوان روکش کابل فشارقوی استفاده می‌شود، در ابتدا به شکل استوانه‌ای است که توسط دستگاه بازیافت پلاستیک به اندازه مطلوب برای استفاده در بتن غلتکی تبدیل شده است. همان طور که در بخش ۳-۱-۱ گفته شد، ضایعات این ماده در محدوده بین دو الک ۳/۸ in و الک شماره ۴ جدا شده و

در مخلوط بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل ۳-۳ مربوط به این ضایعات قبل از خرد شدن است.



شکل ۳-۳ یک نمونه از ضایعات XLPE قبل از خرد شدن

۳-۲-۲- تهیه مخلوط بتن غلتکی

استاندارد ساخت مخلوط بتنی ASTM C172 بوده است. نحوه و زمان اختلاط در جدول ۳-۵ نشان داده شده است.

جدول ۳-۵ مراحل اختلاط مصالح برای تهیه مخلوط بتن غلتکی

مراحل	مصالح	زمان (دقیقه)
اول	سنگ‌دانه (به همراه XLPE)	۳
دوم	سیمان	۲
سوم	آب	۲

۳-۲-۳- تعیین طرح اختلاطها

طرح اختلاط مناسب با استفاده از آیین‌نامه‌های ACI 211.3R و ACI 325.10R محاسبه شده است.

طرح اختلاط مناسب با استفاده از روش روانی مطلوب از روابط آیین‌نامه‌های ACI 211.3R و نشریه

شماره ۳۵۴ به دست آمده است (مراحل طراحی در بخش ۲-۷-۳-۱ شرح داده شد).

علاوه بر طرح اختلاط شاهد، ضایعات XLPE در ۴ طرح اختلاط با درصدهای حجمی ۵، ۱۵، ۳۰ و

۵۰ جایگزین درشت‌دانه شده است. طرح اختلاط‌های مورد استفاده و مقدار جایگزینی عایق کابل

فشارقوی در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. مقدار آب برای تمام مخلوط‌ها برابر 163 Kg/m^3 است.

جدول ۳-۶ طرح اختلاط‌های مورد استفاده و مقدار ضایعات عایق کابل قدرت

اجزای مخلوط (Kg/m^3)						درصد	نام مخلوط
ضایعات				ماسه	سیمان	حجمی XLPE	
عایق کابل فشارقوی	۳/۴in	۱/۲in	۳/۸in				
۰	۳۳۷	۲۳۴	۶۵۷	۷۷۲	۲۹۸	۰	نمونه شاهد
۱۸/۴۰	۳۳۷	۲۳۴	۵۹۵/۲۴	۷۷۲	۲۹۸	۵	نمونه ۵ درصدی
۵۵/۱۸	۳۳۷	۲۳۴	۴۷۱/۷۳	۷۷۲	۲۹۸	۱۵	نمونه ۱۵ درصدی
۱۱۰/۳۶	۳۳۷	۲۳۴	۲۸۶/۴۵	۷۷۲	۲۹۸	۳۰	نمونه ۳۰ درصدی
۱۸۳/۹۴	۳۳۷	۲۳۴	۳۹/۴۲	۷۷۲	۲۹۸	۵۰	نمونه ۵۰ درصدی

۳-۲-۴- چگالی بتن و زمان تراکم برای درصدهای مختلف XLPE

زمان وی بی و چگالی بتن تازه برای هر درصد XLPE و نمونه‌های شاهد با استفاده از استاندارد ASTM C1170 به دست آمده است. این روش آزمون برای تعیین قوام بتن خشک و خیلی خشک با استفاده از میز لرزه و سربار و تعیین چگالی نمونه بتن متراکم شده به کار می‌رود. چگالی نمونه متراکم شده به وسیله تعیین جرم نمونه و تقسیم آن به حجم ظرف به دست می‌آید. سربار برای تراکم با وزن ۲۲/۷ کیلوگرم استفاده می‌شود. روش انجام آزمایش به این صورت است که ابتدا وزن قالب را ثبت کرده و نمونه‌ای حدود ۲۳ کیلوگرم که نماینده کل مخلوط بتنی است را با روشی حمل کرده که مانع از جدایی سنگ‌دانه‌های درشت شود. سطح داخلی قالب را اندکی مرطوب کرده و حدود ۱۴ کیلوگرم از نمونه بتنی را با بیلچه، به صورت یکنواخت درون استوانه پخش می‌کنند. با کوبه اندکی تراکم داده و سطح نمونه تراز می‌شود. سربار را روی نمونه قرار داده و در غلاف تعبیه شده دستگاه محکم می‌کنند. دقت شود سربار در مرکز استوانه قرار گیرد و به دیواره‌ها نچسبد. میز لرزه و زمان‌سنج را روشن کرده و با استفاده از چراغ‌قوه، بتن را در فضای حلقوی بین لبه سربار و جداره داخلی قالب مشاهده می‌کنند. تراکم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که یک لایه از شیر ملات دورتا دور سربار را فرا گیرد. سپس میز لرزه و زمان‌سنج را متوقف کرده و مدت زمان تراکم ثبت می‌شود. با وزن کردن نمونه متراکم شده چگالی بتن نیز به دست می‌آید. در شکل ۳-۴ روند اندازه‌گیری زمان وی بی و چگالی بتن نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ اندازه‌گیری زمان تراکم و چگالی بتن

اسلامپ بتن نیز با استاندارد ASTM C143 به دست آمده و مقدار آن مطابق با ویژگی‌های بتن غلتکی برابر صفر شده است. در شکل ۳-۵ اسلامپ اندازه‌گیری شده، نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ اسلامپ صفر مخلوط روسازی بتن غلتکی

۳-۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری و ساخت نمونه‌های آن

در این آزمایش برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی از استاندارد ASTM C39 استفاده شده است. این روش آزمایش شامل اعمال بارگذاری محوری بر روی نمونه‌ها، در یک محدوده سرعت مشخص تا گسیختگی نمونه است. سرعت بارگذاری آزمایش ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه بوده است. در آزمایش مقاومت فشاری از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰cm و ارتفاع ۲۰cm استفاده شد. نمونه‌ها در ۳ لایه تقریباً مساوی درون قالب ریخته شده و هر لایه به وسیله سربار با فشار 50 gr/cm^2 تحت تراکم قرار گرفته است. تراکم تا زمانی که شیره ملات به صورت حلقه‌ای در اطراف سربار قرار گیرد، ادامه می‌یابد. زمان ویبره نیز قبلاً با دستگاه وی بی برای طرح اختلاط اصلی مطابق با آیین‌نامه ACI 325.10R، بین ۳۰ تا ۵۵ ثانیه محاسبه شده است.

در این تحقیق بدون در نظر گرفتن نمونه‌های آزمایشی برای تعیین طرح اختلاط، ۴۵ نمونه استوانه‌ای اصلی برای آزمایش مقاومت فشاری ساخته شده است. نمونه‌ها پس از ساخته شدن، ۲۴ ساعت درون قالب نگهداری شدند. در این مدت روی قالب‌ها به وسیله پوشش پلاستیکی پوشانده شد تا از تبخیر آب بتن جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها از قالب جدا شد و به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز درون حوضچه‌ی آب مطابق آیین‌نامه ASTM C171 نگهداری شدند. درنهایت آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌ها با استاندارد ASTM C39 انجام شده است.

در شکل ۳-۶ طریقه ساخت نمونه‌های استوانه‌ای تحت سربار و روی میز ویبره نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ ساخت نمونه‌های استوانه‌ای با سر بار روی میز ویبره

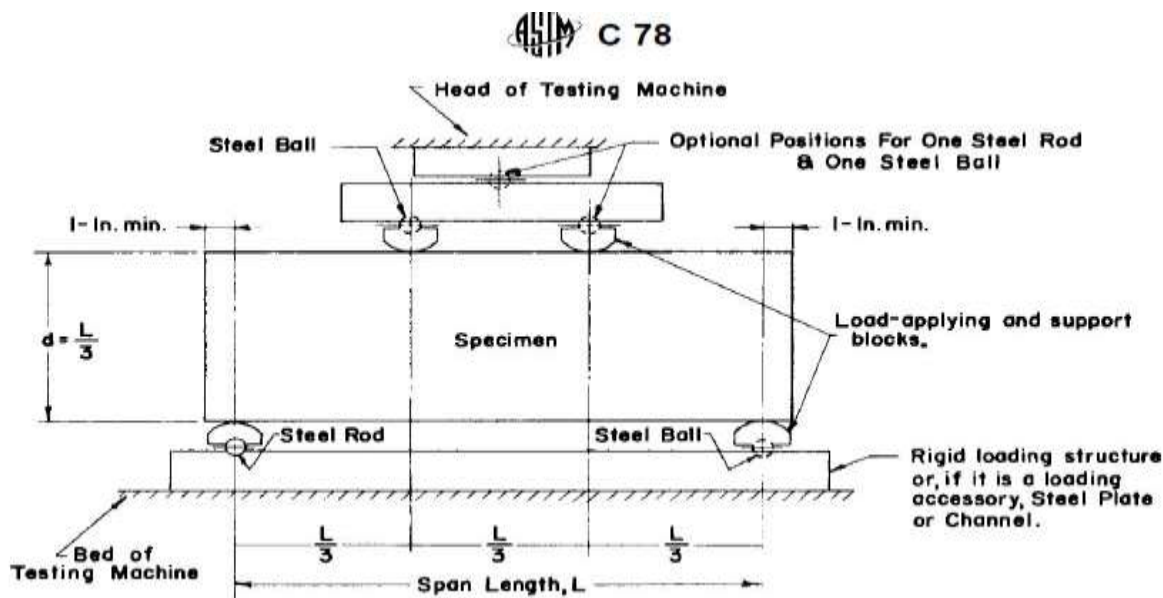
۳-۲-۶- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و ساخت نمونه‌های آن

این آزمایش با اعمال نیروی فشاری قطری روی طول نمونه استوانه‌ای بتن تا گسیختگی نمونه انجام می‌شود. این بارگذاری فشار کششی را روی سطح تحت بار اعمال شده و مقاومت فشاری نسبتاً بالایی بدون واسطه به سطح بارگذاری وارد می‌کند. زمانی که شکست فشاری انجام می‌شود، گسیختگی کششی نیز رخ داده است. همچنین از تخته‌های چند لایه نازک تکیه‌گاهی برای توزیع بار در طول استوانه استفاده می‌شود. مقاومت کششی با تقسیم حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه بر ضریب هندسی مناسب نمونه به دست می‌آید. روند تغییرات مقاومت کششی در مخلوط‌های مختلف و مقایسه آن با نمونه‌های شاهد نیز همانند مقاومت فشاری از اهداف پژوهش است. این مهم با قرار دادن نمونه‌های استوانه‌ای به صورت قطری در فک دستگاه و اعمال نرخ بارگذاری ۶۸۹ تا ۱۳۸۰ کیلوپاسکال بر دقیقه مطابق استاندارد ASTM

C496 انجام شده است. در آیین‌نامه AASHTO مقدار حداقل مقاومت کششی حدود ۲ مگاپاسکال عنوان شده است. برای آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم اندازه قالب‌ها و مقدار سربار و نحوه ساخت نمونه نیز دقیقاً مانند نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری بود. برای این آزمایش نیز ۴۵ نمونه‌ی استوانه‌ای اصلی ساخته شد و نمونه‌ها ۲۴ ساعت اولیه درون قالب با روکش پلاستیکی نگهداری شدند و سپس به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز درون حوضچه آب مطابق آیین‌نامه ASTM C171 نگهداری شده‌اند. بعد از زمان عمل‌آوری آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌ها با استاندارد ASTM C496 انجام شد. فرآیند و بیره کردن برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم تا لحظه پدیدار شدن شیره ملات در اطراف سربار ادامه داشت.

۳-۲-۷- آزمایش مقاومت خمشی و ساخت نمونه‌های آن

این آزمایش برای تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های عمل‌آوری شده، استفاده می‌شود. نتایج این آزمایش برای محاسبه مدول گسیختگی گزارش می‌شود. مقدار مقاومت با توجه به اندازه نمونه‌های مختلف، آماده‌سازی، حالت رطوبتی، عمل‌آوری برای تیر ریخته شده در قالب یا تیر بریده شده متغیر است. طول دهانه نمونه با ۲ درصد تلورانس، باید ۳ برابر عرض نمونه باشد و نمونه‌های عمل‌آوری شده در رطوبت باید بلافاصله پس از خارج کردن از حوضچه رطوبت انجام شود. این آزمایش می‌تواند بر اساس روش خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای انجام شود که در این پژوهش از روش خمش چهار نقطه‌ای استفاده شده است. شکل ۳-۷ محل قرارگیری مناسب نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۳ محل قرارگیری نمونه در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای (ASTM C78)

برای این آزمایش از قالب‌های مستطیلی با طول ۳۵cm و عرض ۱۰cm و ارتفاع ۱۰cm استفاده شده است. برای این آزمایش نیز ۴۵ نمونه مستطیلی (به شکل تیر) ساخته شد. روش ساخت نمونه به صورتی بود که هر نمونه در ۳ لایه تقریباً مساوی ریخته شده و تحت سربار با فشار 25 gr/cm^2 روی میز ویبره انجام شده است. نمونه‌ها ۲۴ ساعت اولیه درون قالب نگهداری شده و روی آن‌ها را با روکش پلاستیکی پوشانده شده تا از تبخیر آب بتن در این زمان جلوگیری شود. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب جدا شده و به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مطابق آیین‌نامه ASTM C171 در حوضچه آب عمل‌آوری شد. در پایان مقاومت خمشی با استاندارد ASTM C78 محاسبه شده است. در شکل ۸-۳ نحوه ساخت نمونه‌های این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی تحت سربار و به‌وسیله میز ویبره

۳-۲-۸- عمل‌آوری نمونه‌ها

پس از ساخت نمونه‌ها، برای تأمین رطوبت و عمل‌آوری، نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت درون قالب و در حالتی که روی آن‌ها باروکش نایلونی پوشانده شده بود، نگهداری شده‌اند. عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C171 انجام شده است. سپس نمونه‌ها از قالب خارج‌شده و برای مدت زمان مورد نیاز (۷، ۱۴ یا ۲۸ روز) درون حوضچه آب قرارگرفته‌اند. طریقه نگهداری نمونه‌ها در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



شکل ۹-۳ نحوه عمل آوری نمونه‌ها

فصل چهارم

نتایج آزمایش‌ها و بحث در آن

۴- نتایج آزمایش‌ها و بحث در آن

۴-۱- مقدمه

در این فصل تمام مراحل آزمایشگاهی و نتایج و تحلیل داده‌ها شرح داده شده است. این پژوهش در چهار مرحله انجام پذیرفت که مراحل آن به شرح زیر است:

مرحله اول: شامل محاسبه چگالی بتن و مدت زمان تراکم^۱ برای نمونه‌های شاهد و حاوی ضایعات XLPE و بررسی تأثیر این ضایعات بر ویژگی‌های بتن تازه است.

مرحله دوم: شامل تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای شاهد و حاوی ضایعات XLPE در ۳ دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و تأثیر سنین مختلف عمل‌آوری بر روند کسب مقاومت این مخلوط‌ها است (۴۵ نمونه).

مرحله سوم: شامل تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های استوانه‌ای شاهد و حاوی ضایعات XLPE در ۳ دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و تأثیر سنین مختلف عمل‌آوری بر روند کسب مقاومت این مخلوط‌ها است (۴۵ نمونه).

مرحله چهارم: شامل تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های مستطیلی شاهد (تیری شکل^۲) و حاوی ضایعات XLPE در ۳ دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و تأثیر سنین مختلف عمل‌آوری بر روند کسب مقاومت این مخلوط‌ها است (۴۵ نمونه).

^۱ Vibration Compaction Time

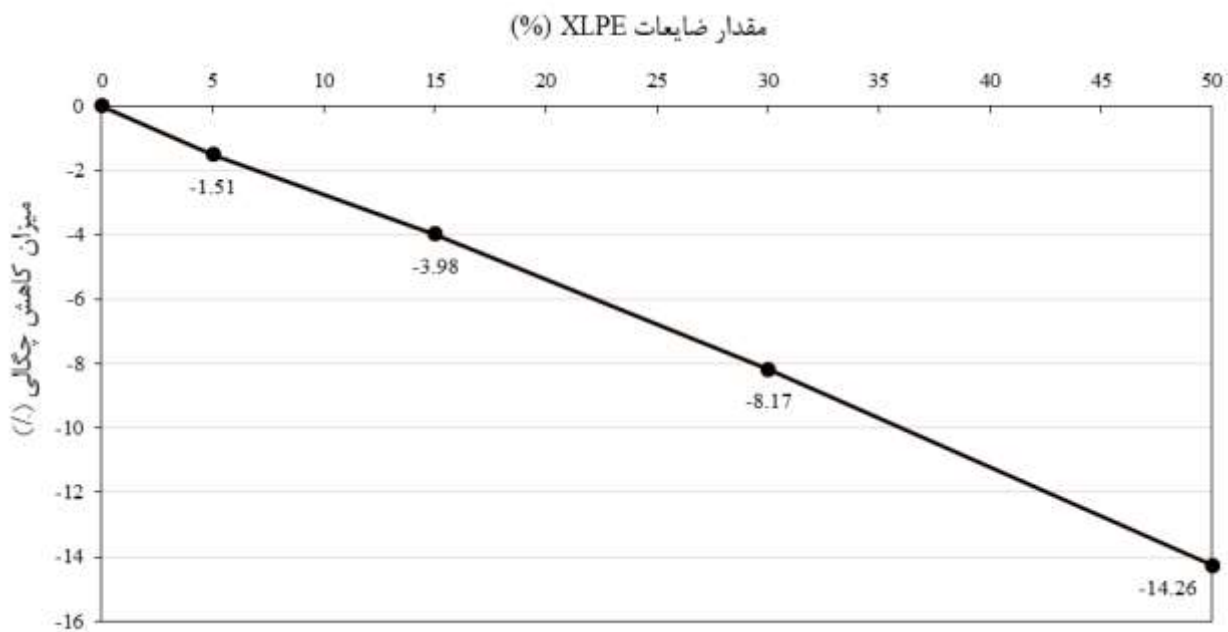
^۲ Beam Shape

تمامی آزمایش‌های ویژگی‌های مکانیکی بتن غلتکی توسط دستگاه یونیورسال^۱ انجام شده است. برای بررسی ویژگی‌های بتن سخت شده در مجموع ۱۳۵ نمونه اصلی برای این پژوهش ساخته و آزمایش شده است (حدود ۳۶ نمونه نیز برای تعیین طرح اختلاط مناسب ساخته شده است).

۴-۲- تأثیر XLPE بر ویژگی‌های بتن تازه

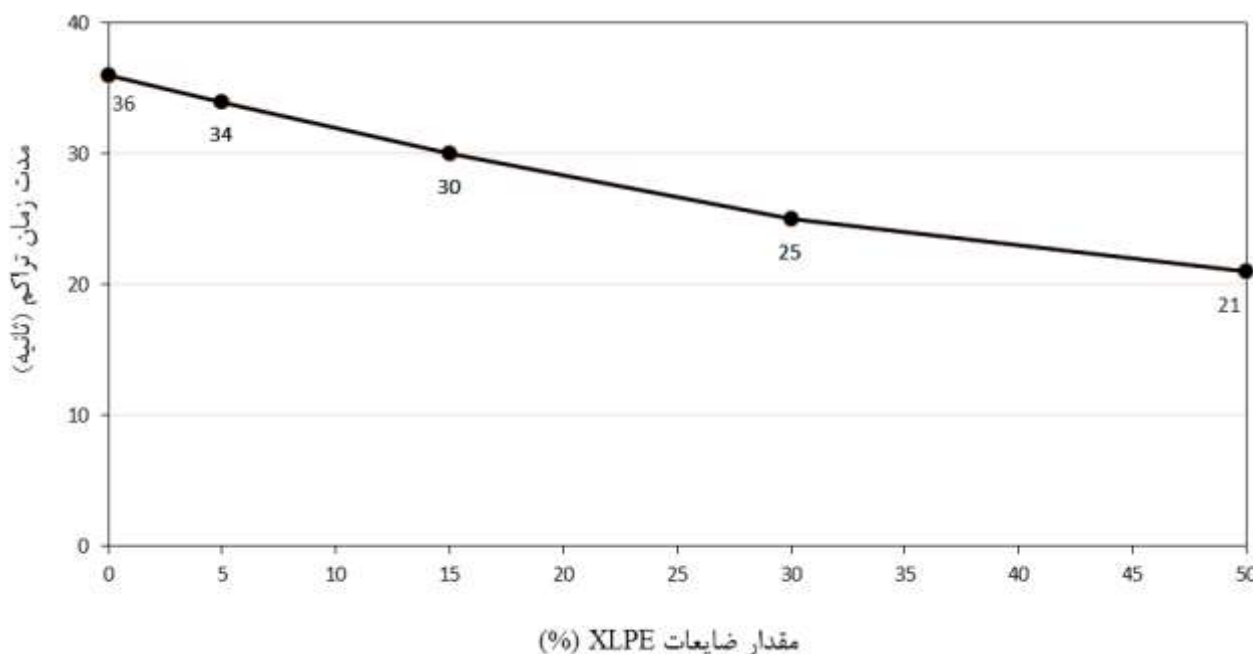
چگالی و زمان تراکم برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی ضایعات XLPE محاسبه شده است. به ترتیب هرچه درصد XLPE در مخلوط بتنی افزایش داده شد، مقدار چگالی بتن کاهش بیشتری داشت. وزن مخصوص نمونه شاهد از 2510 kg/m^3 به 2152 kg/m^3 ، برای جایگزینی ۵۰ درصد حجمی XLPE، کاهش داشته است. بیشترین کاهش وزن مخصوص مربوط به همین جایگزینی ۵۰ درصدی بود که با توجه به شکل ۴-۱ تقریباً برابر ۱۴ درصد است. این کاهش می‌تواند به دلیل پایین‌تر بودن وزن مخصوص XLPE و نیز بیشتر شدن فضای خالی در بتن، در مقایسه با استفاده از سنگ‌دانه طبیعی است. در شکل شماره ۴-۱ رابطه کاهش وزن مخصوص بتن غلتکی متناسب با افزایش درصد ضایعات XLPE نشان داده شده است.

^۱ Universal



شکل ۴-۱ رابطه میان افزایش درصد XLPE و میانگین کاهش چگالی بتن تازه

از آنجا که بتن غلتکی داری اسلامپ صفر است، کارایی آن با آزمایش وی بی اندازه گیری می شود. رابطه‌ی بین مقدار XLPE و مدت زمان تراکم در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. همان طور که نشان داده شده است با افزایش درصد XLPE کارایی مخلوط بتن غلتکی افزایش و زمان تراکم کاهش می یابد. زمان تراکم از ۳۶ ثانیه برای نمونه شاهد به ۲۱ ثانیه برای نمونه ۵۰ درصدی کاهش می یابد. این کاهش می تواند به دلیل جذب آب کمتر XLPE (صفر درصد جذب آب) در مقایسه با سنگدانه طبیعی است. بنابراین مقدار آب آزاد در مخلوط بیشتر شده که باعث روانی بیشتر و سهولت در تراکم می شود.



شکل ۲-۴ رابطه میان مقدار ضایعات XLPE و میانگین مدت زمان تراکم

۳-۴- تغییرات مقاومت فشاری

برای هرکدام از ۵ طرح اختلاط ذکرشده در بخش ۳-۲-۳، سه عدد نمونه مشابه استوانه‌ای به ارتفاع ۲۰ cm و قطر ۱۰ cm ساخته و آزمایش شده است. حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مجاز برای روسازی بتن غلتکی ۲۷/۶ مگاپاسکال است (ACI 325.10R, 2001). آزمایش‌ها نشان داد به جز نمونه‌های ۲۸ روزه شاهد، فقط مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه ۵ درصدی XLPE بیشتر از حداقل مقاومت مجاز ۲۷/۶ مگاپاسکال شد. با این حال همین نمونه‌های ۵ درصدی نیز نسبت به نمونه شاهد اندکی افت مقاومت فشاری داشتند. این افت مقاومت فشاری به گونه‌ای بود که با افزایش درصد XLPE مقاومت فشاری کاهش می‌یافت. مقاومت فشاری ۲۸ روزه از ۲۹/۵ مگاپاسکال برای نمونه شاهد به مقدار ۸/۷۵ مگاپاسکال برای نمونه ۵۰ درصدی XLPE، کاهش یافت. در شکل ۳-۴ انجام این آزمایش توسط دستگاه یونیورسال

نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ نمونه‌های مقاومت فشاری قبل و بعد از آزمایش

همان‌طور که در پژوهشی که توسط لی و همکاران^۱ (۲۰۰۴) در مورد افزودن خرده لاستیک به بتن معمولی انجام شده است، نتیجه گرفته شد که مصالح انعطاف‌پذیر مانند لاستیک در مخلوط‌های مرکب تمرکز تنش ایجاد می‌کنند. این تمرکز تنش باعث از بین بردن چسبندگی بین ماده انعطاف‌پذیر با مخلوط بتنی می‌شود. همچنین می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های مویی در مخلوط بتن شود. تحت بارهای فشاری، اتصال و چسبندگی خرده لاستیک با سنگ‌دانه‌ها همانند فضای خالی در بتن اصلاح شده عمل می‌کند و به ناچار مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد.

بنابراین می‌توان گفت که افت مقاومت می‌تواند در اثر چسبندگی کمتر XLPE نسبت به سنگ‌دانه

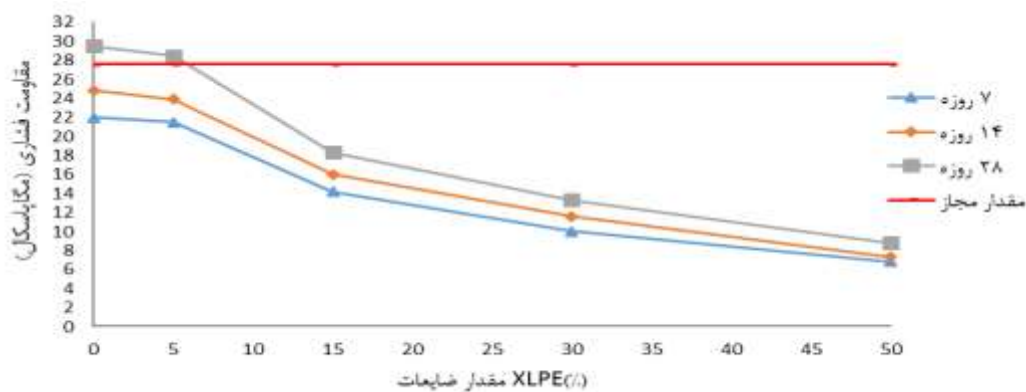
^۱ Li et al.

طبیعی با خمیر سیمان و نیز افزایش تخلخل نمونه‌های شامل XLPE نسبت به نمونه‌ها با سنگ‌دانه طبیعی باشد. در جدول ۱-۴ مقدار مقاومت فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای درصد‌های مختلف XLPE آمده است.

جدول ۱-۴ مقاومت فشاری برای نمونه‌های شاهد و حاوی XLPE

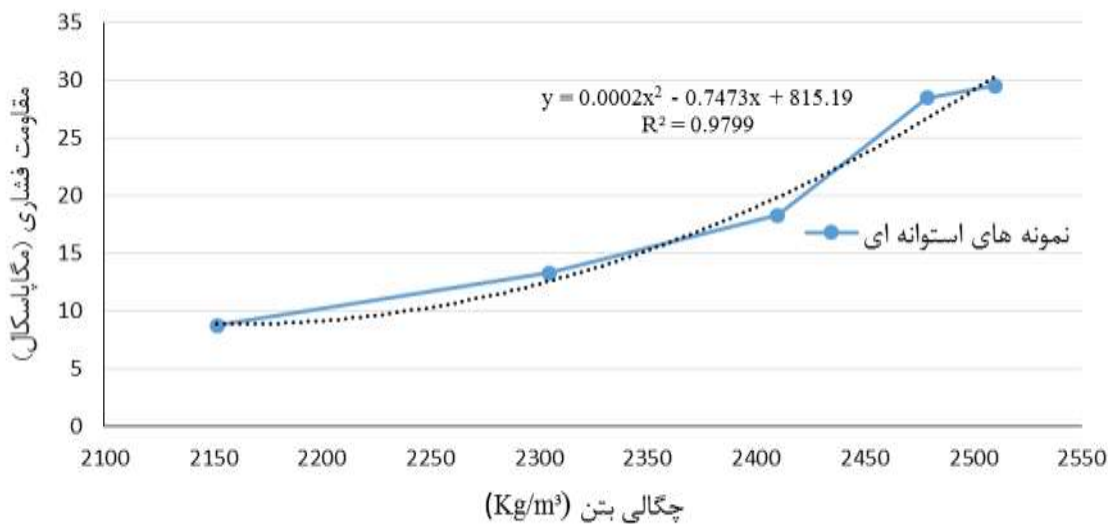
میانگین مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت فشاری هر نمونه (MPa)									نام مخلوط
۲۸ روزه	۱۴ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه			۱۴ روزه			۷ روزه			
			۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	
۲۹.۵	۲۴.۸۶	۲۲	۲۸.۹	۲۹.۴	۲۰.۳	۲۵.۷	۲۳.۸	۲۵.۱	۲۱.۴	۲۱.۲۶	۲۳	نمونه شاهد
۲۸.۴۹	۲۳.۹	۲۱.۵۲	۲۸.۷	۲۷.۷	۲۹.۱	۲۳.۷	۲۴.۹	۲۳.۱۹	۲۱.۵	۲۰.۹۵	۲۲.۱۴	نمونه ۵ درصدی
۱۸.۳۱	۱۶.۰۲	۱۴.۱۹	۱۸.۱	۱۹	۱۷.۷۸	۱۶.۹	۱۵	۱۶.۲۵	۱۳.۵	۱۳.۶۸	۱۵.۴۲	نمونه ۱۵ درصدی
۱۳.۳	۱۱.۶۱	۱۰.۰۳	۱۴.۱	۱۲.۸	۱۲.۹۵	۱۱.۹	۱۱	۱۲	۸.۹۶	۱۱.۳۲	۹.۸۱	نمونه ۳۰ درصدی
۸.۷۵	۷.۳۵	۶.۸۳	۹.۷۸	۸.۵۲	۷.۹۵	۷.۷۱	۶.۸۵	۷.۴۹	۶.۵۷	۶.۲۱	۷.۷۱	نمونه ۵۰ درصدی

در شکل ۴-۴ مقایسه میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها برای درصد‌های مختلف XLPE نشان داده شده است. از بین تمام درصد‌های جایگزین شده تنها نمونه‌ی ۵ درصدی حداقل مقاومت فشاری تعیین شده برای روسازی بتن غلتکی را دارد.



شکل ۴-۴ تأثیر مقدار ضایعات XLPE بر میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها

در شکل ۴-۵ رابطه‌ی بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها و چگالی بتن نشان داده شده است. نتیجه به صورتی بود که هرچه چگالی بتن افزایش یافته، مقاومت فشاری نیز بیشتر شده است. بنابراین بین چگالی بتن و مقاومت فشاری رابطه‌ای مستقیم وجود دارد.



شکل ۴-۵ رابطه‌ی بین چگالی بتن و میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها

۴-۴- تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش‌ها نشان داد با جایگزینی ۵ درصد XLPE در ابتدا افزایش مقاومت کششی رخ داده است. در ادامه هرچه درصد XLPE افزایش یافت، مقاومت کششی افت کرد. مقاومت کششی برای نمونه شاهد ۲۸ روزه از ۲/۹۰ به ۳/۲۳ مگاپاسکال برای نمونه‌های ۵ درصدی افزایش یافت. این افزایش ۱۱ درصدی می‌تواند به دلیل خاصیت انعطاف‌پذیری بیشتر XLPE در مقایسه با سنگ‌دانه اصلی و نیز شکل چندوجهی نامنظم آن باشد که سبب افزایش قفل و بست سنگ‌دانه‌ای در بتن می‌شود. در ادامه هرچه درصد XLPE بیشتر می‌شود، به علت چسبندگی کمتر XLPE نسبت به سنگ‌دانه طبیعی بتن راحت‌تر ترک می‌خورد. پس درصد بهینه جایگزینی که حتی سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود، ۵ درصد است. در نهایت مقاومت کششی برای نمونه ۵۰ درصد جایگزینی XLPE به ۱/۷۲ مگاپاسکال رسید. در شکل ۴-۶ انجام این آزمایش توسط دستگاه یونیورسال نشان داده شده است.



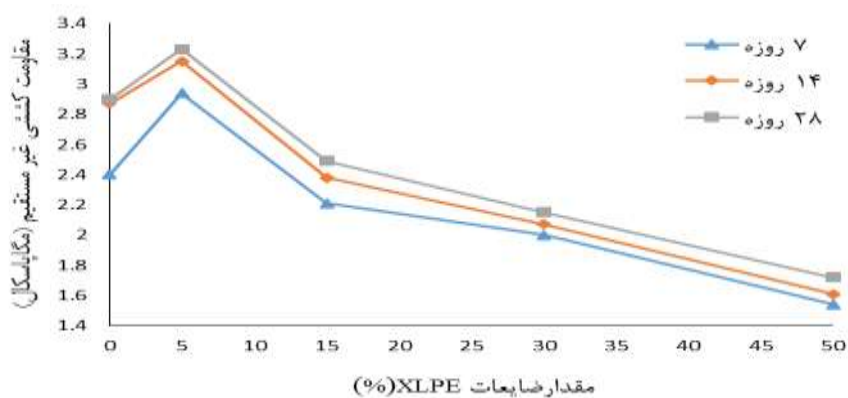
شکل ۴-۶ نمونه‌های مقاومت کششی غیرمستقیم قبل از آزمایش

در جدول شماره ۲-۴ مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم ۱۴، ۷ و ۲۸ روزه برای همه‌ی نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ مقاومت کششی برای نمونه‌های شاهد و حاوی XLPE

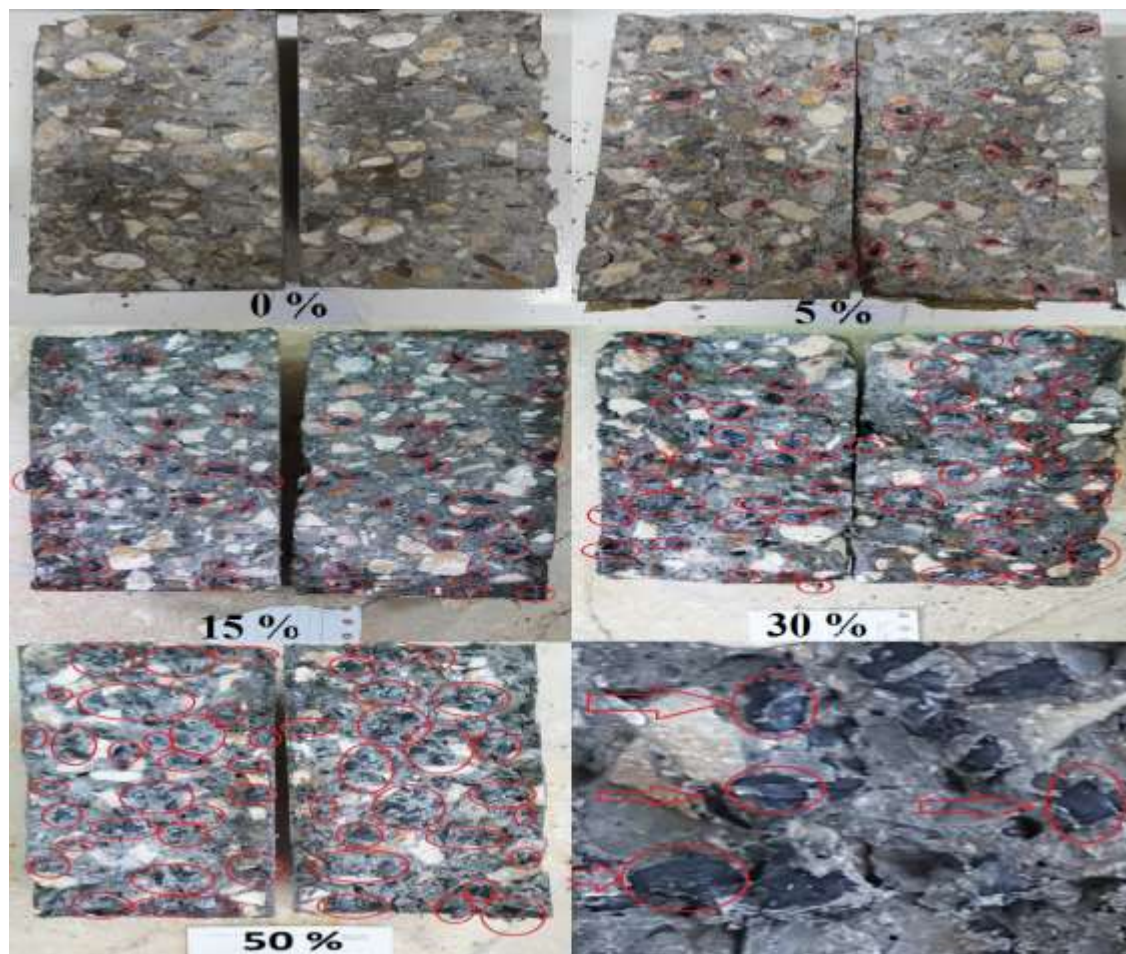
نام مخلوط	مقاومت فشاری هر نمونه (MPa)									میانگین مقاومت فشاری (MPa)		
	روزه ۷			روزه ۱۴			روزه ۲۸			روزه ۷	روزه ۱۴	روزه ۲۸
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳			
نمونه شاهد	۲.۶۱	۲.۱۱	۲.۴۸	۲.۸۴	۲.۸۹	۲.۸۸	۲.۹	۲.۸۹	۲.۹۱	۲.۴	۲.۸۷	۲.۹
نمونه ۵ درصدی	۲.۹۷	۲.۹۶	۲.۸۹	۳.۱۸	۳.۱۲	۳.۱۵	۳.۲۶	۳.۱۹	۳.۲۴	۲.۹۴	۳.۱۵	۳.۲۳
نمونه ۱۵ درصدی	۲.۲۴	۲.۲۱	۲.۱۸	۲.۴۱	۲.۳۳	۲.۴	۲.۴۲	۲.۵۴	۲.۵۱	۲.۲۱	۲.۳۸	۲.۴۹
نمونه ۳۰ درصدی	۲.۰۳	۱.۹۶	۲.۰۱	۲.۰۹	۲.۰۸	۲.۰۴	۲.۱۵	۲.۱۲	۲.۱۸	۲	۲.۰۷	۲.۱۵
نمونه ۵۰ درصدی	۱.۵۶	۱.۵۱	۱.۵۵	۱.۶۳	۱.۵۸	۱.۶۲	۱.۶۷	۱.۷۵	۱.۷۴	۱.۵۴	۱.۶۱	۱.۷۲

در شکل ۷-۴ مقایسه میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها برای درصدهای مختلف XLPE نشان داده شده است.



شکل ۷-۴ تأثیر مقدار ضایعات XLPE بر میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها

در شکل ۴-۸ نمونه‌های دونیم شده بعد از این آزمایش نشان داده شده است. برای تشخیص بهتر ضایعات، برخی از ذرات XLPE درون دایره‌های قرمز قرار داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت پراکندگی XLPE در مخلوط روسازی بتنی تقریباً یکنواخت است و تقریباً تمام سنگ‌دانه‌های طبیعی شکسته شده و ترک سنگ‌دانه‌ها را دور نزده است. این امر نشان دهنده‌ی مقدار مناسب نسبت آب به سیمان و چسبندگی خوب خمیر سیمان با سنگ‌دانه‌ها است. ولی هرچه درصد ضایعات بیشتر شده است، شکستگی از محل ضایعات اتفاق افتاده است که به دلیل چسبندگی کمتر XLPE نسبت به سنگ‌دانه طبیعی است.



شکل ۴-۸ نمونه‌های مقاومت کششی غیرمستقیم بعد از آزمایش

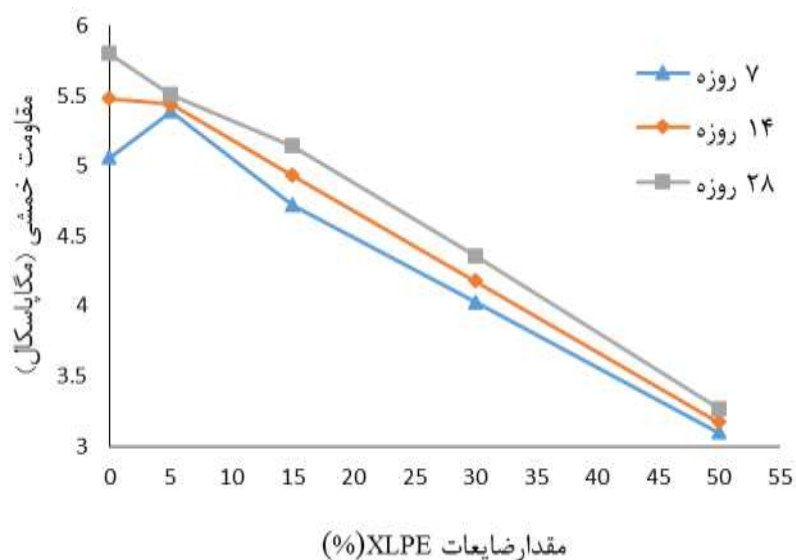
۴-۵- تغییرات مقاومت خمشی

آزمایش‌ها نشان داد تنها نمونه‌های ۵ درصدی ۷ روزه در مقایسه با نمونه‌های شاهد ۷ روزه باعث افزایش مقاومت خمشی شد. در سایر نمونه‌ها با افزایش درصد XLPE همواره مقاومت خمشی کاهش یافت. چسبندگی XLPE کمتر از سنگ‌دانه طبیعی در مخلوط روسازی بتنی است و نیز بعد از استفاده از XLPE تخلخل مخلوط بیشتر شده است که می‌توانند سبب کاهش مقاومت خمشی شوند. در جدول ۳-۴ مقدار مقاومت خمشی نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای درصدهای مختلف XLPE نشان داده شده است.

جدول ۳-۴ مقاومت خمشی برای نمونه‌های شاهد و حاوی XLPE

نام مخلوط	مقاومت فشاری هر نمونه (MPa)									میانگین مقاومت فشاری (MPa)		
	۷ روزه			۱۴ روزه			۲۸ روزه			۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳			
نمونه شاهد	۴.۹۶	۵.۱۳	۵.۰۹	۵.۱۹	۵.۶۱	۵.۶۴	۵.۷۴	۵.۸۵	۵.۸۱	۵.۰۶	۵.۴۸	۵.۸
نمونه ۵ درصدی	۵.۳۷	۵.۴۲	۵.۳۸	۵.۴۴	۵.۴۵	۵.۴۲	۵.۴۶	۵.۵۴	۵.۵۳	۵.۳۹	۵.۴۴	۵.۵۱
نمونه ۱۵ درصدی	۴.۷۴	۴.۶	۴.۸۲	۵.۱۹	۵.۰۳	۴.۵۷	۵.۲۲	۵.۰۵	۵.۱۵	۴.۷۲	۴.۹۲	۵.۱۴
نمونه ۳۰ درصدی	۴.۰۸	۳.۹۷	۴.۰۴	۴.۲۷	۴.۱۱	۴.۱۶	۴.۲۹	۴.۴۱	۴.۳۸	۴.۰۳	۴.۱۸	۴.۳۶
نمونه ۵۰ درصدی	۳.۱	۳.۱۲	۳.۰۸	۳.۲۱	۳.۱۲	۳.۱۸	۳.۲۳	۳.۲۶	۳.۲۲	۳.۱	۳.۱۷	۳.۲۷

در شکل شماره ۴-۹ مقایسه میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها برای درصدهای مختلف XLPE نشان داده شده است.



شکل ۴-۹ تأثیر مقدار ضایعات XLPE بر میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها

شکل ۴-۱۰ مربوط به آزمایش مقاومت خمشی با دستگاه یونیورسال است. نتایج نشان داد نمونه‌های شاهد که XLPE ندارند در زمان آزمایش به دو قسمت جداگانه تبدیل شده است ولی سایر نمونه‌های ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصدی XLPE به دو قسمت تبدیل نشده و فقط ترک خوردند. این نشان می‌دهد استفاده از ضایعات XLPE در روسازی بتن غلتکی، سبب افزایش شکل‌پذیری بتن می‌شود. بنابراین وجود XLPE و افزایش درصد آن سبب افزایش جذب انرژی شده و شکست آن را شکل‌پذیرتر می‌کند. هر چه درصد XLPE بیشتر شد، اندازه ترک نیز کوچک‌تر شده است.



شکل ۴-۱۰ مقایسه شکست نمونه‌های خمشی و اندازه ترک برای درصدهای مختلف آزمایش

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق امکان استفاده از ضایعات پلی اتیلن کراس لینک یا به اختصار XLPE، به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی با درصدهای حجمی مختلف، در مخلوط روسازی بتن غلتکی ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از XLPE به عنوان سنگدانه طبیعی سبب بهبود برخی از خواص روسازی بتن غلتکی می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده در این خصوص می‌توان به موارد زیر به عنوان دستاوردهای این پژوهش اشاره کرد:

۱. استفاده از ضایعات XLPE باعث افزایش کارایی مخلوط بتن غلتکی می‌شود. دلیل این امر جذب آب صفر درصدی XLPE است. بنابراین آب آزاد در مخلوط افزایش یافته و سبب افزایش کارایی بتن غلتکی می‌شود. میزان کارایی با درصد XLPE رابطه مستقیم دارد یعنی با افزایش درصد ضایعات، کارایی نیز بیشتر شده است.
۲. افزایش کارایی مخلوط بتن غلتکی سبب کاهش زمان تراکم و سهولت در اجرای آن می‌شود. استفاده از XLPE باعث کاهش زمان تراکم تا ۴۲ درصد برای حالت جایگزینی حجمی ۵۰ درصد درشت‌دانه شده است. بنابراین با توجه به الزامات طرح، در مسیرهایی که زمان اجرا حائز اهمیت است می‌توان از این مواد استفاده کرد.
۳. استفاده از این مواد بازیافتی همواره سبب کاهش چگالی بتن غلتکی شده است. این کاهش به گونه‌ای بوده است که هرچه درصد ضایعات XLPE بیشتر شد، کاهش چگالی نیز بیشتر گردید. بیشترین کاهش تقریباً برابر ۱۴ درصد شده که مربوط به جایگزینی ۵۰ درصدی XLPE است.

این کاهش چگالی به دلیل کمتر بودن وزن مخصوص XLPE نسبت به سنگدانه اصلی و افزایش فضای خالی پس از جایگزینی این مواد است.

۴. بتن غلتکی شامل XLPE مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشت. روند افت مقاومت فشاری به گونه‌ای بوده است که هرچه درصد XLPE افزایش یافت، مقاومت فشاری نیز کاهش بیشتری داشت. این اتفاق می‌تواند به دلیل چسبندگی کمتر این مواد بازیافتی در مقایسه با سنگدانه طبیعی و یا مقاومت فشاری کمتر XLPE نسبت به سنگدانه طبیعی و نیز افزایش تخلخل و فضای خالی بعد از جایگزینی این مواد بازیافتی باشد.

۵. ۵ درصد جایگزینی حجمی سنگدانه، بهترین درصد جایگزینی بوده است. زیرا مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی بعد از این جایگزینی توانسته است حداقل مقاومت تعیین شده در آیین‌نامه برای لایه اصلی روسازی را تأمین کند.

۶. بیشترین افت مقاومت فشاری مربوط به جایگزینی ۵۰ درصدی ضایعات XLPE بوده است. در این حالت مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های شاهد تقریباً ۷۰ درصد افت مقاومت داشتند.

۷. مقاومت کششی غیرمستقیم پس از جایگزینی ۵ درصد حجمی XLPE، برای نمونه‌های ۲۸ روزه ۱۱ درصد افزایش یافت. این افزایش می‌تواند به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بیشتر XLPE در مقایسه با سنگدانه اصلی و نیز شکل چندوجهی نامنظم آن باشد که سبب افزایش قفل و بست سنگدانه‌ای در بتن می‌شود. نمونه‌های شاهد بعد از آزمایش به دو قسمت جداگانه تبدیل شده ولی نمونه‌های حاوی XLPE فقط ترک‌خورده و دو قسمت نشده‌اند.

۸. با افزایش بیشتر از ۵ درصد XLPE، مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش پیدا کرده است. این امر می‌تواند به خاطر افزایش فضای خالی و تخلخل بیشتر نمونه‌ها و چسبندگی کمتر XLPE در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی باشد. مقدار افت مقاومت کششی بسیار کمتر از افت مقاومت

فشاری بوده است و حداکثر افت مقاومت کششی بعد از جایگزینی ۵۰ درصدی ضایعات حدود ۴۰ درصد شده است.

۹. تنها در نمونه‌های ۷ روزه ۵ درصدی ضایعات XLPE مقاومت خمشی ۶ درصد افزایش یافت. سایر نمونه‌های ۵ درصدی ۱۴ و ۲۸ روزه و درصدهای دیگر آزمایش نسبت به نمونه‌های شاهد افت مقاومت خمشی داشته‌اند. با افزایش درصد ضایعات، همواره افت مقاومت خمشی نیز افزایش یافته است ولی این افت مقاومت خمشی نسبت به افت مقاومت فشاری و کششی کمتر بوده است. چسبندگی کمتر XLPE نسبت به سنگ‌دانه طبیعی و افزایش فضای خالی می‌تواند باعث این افت مقاومت شده باشد.

۱۰. در طراحی اشتو مقدار حداقل مقاومت خمشی ۳/۵ مگاپاسکال است. مشاهده شده است که به جز نمونه ۵۰ درصدی، مقاومت خمشی جایگزینی‌های ۵، ۱۵ و ۳۰ درصدی بیشتر از مقدار مجاز تعیین شده است. حتی مقدار مقاومت خمشی نمونه ۵۰ درصدی نیز بسیار نزدیک به مقدار مجاز است (۳/۲۷ مگاپاسکال).

۱۱. هر چه مقدار XLPE در مخلوط روسازی بتن غلظتی بیشتر شد، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی نیز افزایش یافته است. این پدیده به گونه‌ای بود که نمونه‌های شاهد فاقد این ضایعات دچار گسیختگی شده و به دو قسمت جداگانه تبدیل شده و شکست ترد اتفاق افتاده است. ولی نمونه‌های حاوی XLPE فقط ترک‌خورده و دچار گسیختگی نشده‌اند. هرچه درصد XLPE افزایش یافت، اندازه ترک نیز کوچک‌تر شده است.

۱۲. این تحقیق نشان داده است که می‌توان از ضایعات XLPE به عنوان سنگ‌دانه در روسازی بتن غلظتی استفاده کرد. با مقاومت طراحی ۳۰ مگاپاسکال مقاومت فشاری ۵ درصد حجمی جایگزینی بیشتر از مقدار مجاز شده است. سایر درصدهای ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد را می‌توان برای

روسازی با ترافیک سبک، راه‌های روستایی، محوطه‌های بزرگ صنعتی، پارکینگ‌های طبقاتی و پیاده‌روها استفاده کرد.

۱۳. علاوه بر عملی بودن استفاده از این ضایعات در روسازی بتن غلتکی و بهبود برخی ویژگی‌های آن، استفاده از ضایعات XLPE سبب بازیافت آن‌ها شده است. با توجه به اینکه این ضایعات تجزیه ناپذیر هستند و روانی پایینی دارند (قابلیت بازیافت بسیار کم) این کار از جنبه‌ی زیست‌محیطی بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود.

۵-۲- پیشنهادها

در رابطه با تحقیق‌های آینده موارد زیر پیشنهاد داده می‌شود:

۱. بررسی رفتار خستگی در روسازی‌های بتن غلتکی حاوی ضایعات XLPE
۲. ارزیابی روش‌های افزایش زبری سطح روسازی بتن غلتکی و تأثیرگذاری آن‌ها
۳. بررسی عملکرد روسازی بتن غلتکی حاوی ضایعات XLPE در شرایط ذوب و انجماد شدید
۴. استفاده از ضایعات XLPE به عنوان ریزدانه و تأثیر آن بر ویژگی‌های مکانیکی و شکل‌پذیری روسازی بتن غلتکی

مراجع

(۱) حسنی ا.، (۱۳۹۲) "روسازی بتنی راه‌ها (راهنمای طرح، اجرا و نگهداری)" پژوهشکده حمل‌ونقل، تهران، ایران.

(۲) داور نیا. ش.، (۱۳۸۲)، "امکان‌سنجی کاربرد بتن غلتکی در روسازی راه‌های ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی.

(۳) "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور" (نشریه شماره ۳۵۴، ۱۳۸۸)، معاونت نظارت راهبردی رئیس‌جمهور.

(۴) کریمی گ. م.، (۱۳۸۹)، "استفاده از بتن غلتکی در روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها"، سمینار کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس دانشکده عمران.

(۵) کریمی گ. م.، حسنی ا.، (۱۳۹۰) "بررسی استفاده از خرده‌های آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگ‌دانه بر بتن غلتکی روسازی راه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس دانشکده عمران.

(۶) عامری. م.، شکرچی زاده. م.، شهابی ش. ح.، (۱۳۸۸)، "بررسی تأثیر استفاده از سرباره کنورتور ذوب‌آهن اصفهان به عنوان جایگزین سنگ‌دانه بر بتن غلتکی روسازی راه"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز.

[7] AASHTO, (2009), "Guide for Design of pavement structure". American Association of State Highway and Transportation Official, DC. Used by permission.

[8] ACI 325.10R, (2001), “**State of art Report on Roller Compacted Concrete Pavements**”. American concrete Institute report ACI 325.10-95

[9] ACI 325.6 R-88, (1997), “**Texturing Concrete Pavements**”. Standard by American Concrete Institute.

[10] ACI 211.3R, (1997), “**Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete**”. American Concrete Institute.

[11] Aliabdo, A., Elmoaty M, a., Aboshama, A., (2016), “**Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete**”. Construction and Building Materials 124, 866–877.

[12] American Society for Testing and Materials (ASTM) C1170/C1170M-08, (2008), “**Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[13] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C127- 07, (2001), “**Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[14] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C127-88, (2003), “**Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[15] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C 131 – 03, (2003), “**Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[16] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C172-99, (1999), “**Standard practice for sampling freshly mixed concrete**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[17] American Society for Testing and Materials (ASTM) C171-97A, (1997),

“Standard practice for sheet materials for curing concrete”, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[18] American Society for Testing and Materials (ASTM) C39/C39M-11a, (2011), **“Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”** Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[19] American Society for Testing and Materials (ASTM) C78-07, (2007), **“Standard test method for Flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)”**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[20] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C33/C33M, (2011), **“Standard Specification for Concrete Aggregates”**, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[21] American Society for Testing and Materials (ASTM) C 143/C 143M – 03, (2003), **“Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[22] American Society for Testing and Materials (ASTM) C496-96, (1996), **“Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens”**. Annual book of ASTM Standards, Pennsylvania, USA.

[23] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C618, (1997), **“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”**, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[24] American Society for Testing and Materials, (ASTM) C989, (1997), **“Standard Specification for Ground Granulated Blast- Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars”**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[25] American Society for Testing and Materials (ASTM) C1170/C1170M-08, (2008) **“Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table”**. West Conshohocken, Pennsylvania,

USA.

[26] American Society for Testing and Materials, (ASTM) D 2419 – 02, (2002), **“Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate”**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[27] American Society for Testing and Materials, (ASTM) D1557, (2001), **“Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort”**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[28] Anderson, R, (1987), **“Swedish Experience with RCC”**, Concrete International, Feb., pp, 18-24.

[29] Christéen. J., (2007), **“Swedish cable waste for recovery in China or Sweden”**. Master thesis report, LiTH, Linköping.

[30] Courard, L., Michel, F., Delhez, P., (2010), **“Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete”**. Construction and Building Materials. 24, 390–395. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040.

[31] Delagrave, A., Marchand. A., Pigeon. M., Boisvert. J., (1997) **“Deicer Salt Scaling Resistance of Roller Compacted Concrete Pavements”**, ACI – Materials Journal.

[32] Fakhri, M., Saberi, K. F., (2016), **“The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement”**. Journal of Cleaner Production. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.017.

[33] Feng, L., Liang-yu, M., Guo-Fang, N., Li-Juan, L., (2015), **“Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement”**. Construction and Building Materials. 95, 207–217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.042>.

[34] Gregory E. Halsted, P.E., (2009), **“Roller-Compacted Concrete Pavements for Highways and Streets”**. Paper prepared for presentation at the Advances in Pavement Design and Construction Session of the 2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Vancouver, British Columbia.

[35] Ghaffori, N., Zhang, Z, (1998), “**Sulfate Resistance of Roller Compacted Concrete**”, ACI Materials Journals, PP 347-355.

[36] Hodgkinson, J.R., (1991), “**Design and Construction of Roller Compacted Concrete (RCC) Pavement**“. Cement and Concrete Association of Australia.

[37] Huang, H. Y., (2004) “**Pavement analysis and design**”, Second Edition, University of Kentucky, United States of America.

[38] Krishnamoorthya, R. R., Davida, T. K., Mastorb, E. N. A. B., Nadarasac, I. K., (2016), “**Repair of Deteriorating Pavement Using Recycle Concrete Materials**”. Procedia Engineering. 142, 370 – 381. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.02.064.

[39] Li, G., stubblefield, M., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B., (2004), “**Development of waste tire modified concrete**”. Cem. Coner, Res. 34 (12) 2283-2289.

[40] Li, J., Tu, G., LAN, C., Liu, F., (2016), “**Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled aggregate concrete**”. Journal of Cleaner Production 124 325-338, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.003>.

[41] Lu, C., Zhang, X., Liang, M., (2009), “**Mechanochemical Recycling and Processing of Waste Crosslinked Polymers: Waste Tire Rubber and Waste XLPE from Cables Scraps**”. The 5th ISFR, Chengdu, China.

[42] Lv, J., Zhou, K., Du, Q., Wu, H., (2015), “**Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete**”. Construction and Building Materials.91, 145–149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.038>.

[43] Malish, W. R., (1988),”**Roller Compacted Concrete Pavements**”, Concrete Construction, pp 13-17.

[44] Manjunath B T, A., (2016), “**Partial replacement of E-plastic Waste as Coarse-aggregate in Concrete**”. Procedia Environmental Sciences.35, 731–739. doi:10.1016/j.proenv.2016.07.079.

[45] Meddah, A., Beddar, M., Bali, A., (2014), **“Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. Journal of Cleaner Production”**. doi:10.1016/j.jclepro.2014.02.052.

[46] Modarres, A., Hosseini, Z., (2014), **“Mechanical Properties of Roller Compact Concrete Containing Rice Husk Ash with Original and Recycled Asphalt Pavement Material”**. Materials and Design. Doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.072.

[47] Naik, T.R., Chun. Y. M., Kraus. R. N., Singh. S. S., (2001), **“Strength and Durability of Roller Compacted HVFA Concrete Pavements”**. Practice Periodical on Structural Design and Construction, November pp 154-165.

[48] Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), (1993), **“Use of roller compacted concrete for roads”**. Technical committee for concrete roads, France.

[49] Pittman, D.W. (1996), **“Factors Affecting Joints Efficiency of Roller Compacted Concrete Pavement Joints and Cracks”**, Transportation Research Record Sept, pp 10-20.

[50] Portland Cement Association (PCA), (2010), **“Guide for Roller Compacted-Concrete Pavements”**.

[51] Settari, Ch., Debieb, F., Hadj Kadri, El., Boukendakdji, O., (2015), **“Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete”**. Construction and Building Materials. 101, 617–621.

[52] Shang, L., Wang, Sh., Zhang, Y., Zhang, Y., (2010). **“Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt”**. Construction and Building Materials. 25, 886–891. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.097.

[53] Silva a, R, V., de Brito a, J., Saikia, N., (2012), **“Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates”**. Cement & Concrete Composites.35, 23–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>.

[54] Tricbes, G., (1998), “**The Fatigue Behavior of Rolled Compacted Concrete**”, 8th International Symposium on Concrete Roads, Theme II, Portugal.

[55] Tokuda, Sh., Horikawa, S., Negishi, k., Uesugi, K., Hirukawa, H., (2003), “**Thermoplasticizing Technology for the Recycling of Crosslinked Polyethylene**”, Furukawa Review, Japan.

[56] United States Army Corps of Engineers (USACE), (1995), “**Roller Compacted Concrete Pavement Design and Construction**”. Technical Letter No. ETL 1110-3-475.

[57] Villena. J., Trichês G., Prudêncio Jr. L. R. (2011), “**Replacing the Aggregate by Rice Husk Ash in Roller Compacted Concrete for Composite Pavements**”. GeoHunan International conference, Hunan. China.

[58] Yu, X., Tao, Z., Song, T., Pan, Z., (2016), “**Performance of concrete made with steel slag and waste glass**”. Construction and Building Materials 114, 737–746.

Abstract

For a long time that Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) has been taken into consideration as one of concrete pavement types due to the ease of implementation and no need to steel reinforcement. Unlike other concrete pavements, RCCP is enough dry to be compacted by vibratory rollers. Due to the growth of industrial wastes, researchers have tended to use waste in RCCP mix. Large amounts of electric wires and cables annually produced and these products have a lot of wastes. Cross-linked polyethylene (XLPE) is one of this wastes used and it is rapidly growing in this years. In fact XLPE Used for insulation of electric wires and cables and it is non-biodegradable component. This study was carried out to investigate the use of XLPE waste as aggregate in RCCP mix. XLPE waste as aggregate with different volume ratio was replaced by the natural coarse aggregate of concrete mix. This replacement was conducted with 5, 15, 30 and 50 %. Unit weight, VeBe time, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength were measured for all specimens. The results indicated that using XLPE waste changed properties of fresh and hardened concrete. XLPE waste causes reduction of unit weight and VeBe time. The results showed that replacing 5 % of coarse aggregate with XLPE waste increased 10% 28-d splitting tensile strength of RCCP. In addition, the 28-d compressive and flexural strengths of this concrete mix became greater than the minimum compressive and flexural strength determined in RCCP guide. According to the test results, using XLPE waste in more than 5 % of coarse aggregate of the mix are recommended for low traffic pavements, rural roads and sidewalks. Moreover, using XLPE waste increased ductility and resistance against RCCP cracking. Overall, using XLPE waste in RCCP can prevents entering wastes into the environment. And, it reduces landfill cost and it is energy saving.

Keywords: Cross-linked polyethylene; Roller compacted Concrete pavement; Recycled waste; Mechanical properties



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc.Thesis in Road and Transport Engineering

**Experimental investigation of recycled cross-linked polyethylene used
as aggregate in Roller Compacted concrete pavement mixture**

By:

Mohsen Shamsaei

Supervisor:

Dr. Iman aghayan

Advisor:

Eng. Kani Akhavan Kazemi

February 2017