

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش: راه و ترابری

ارزیابی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی حاوی سرباره، پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی

نگارنده :

میلاد حاجی ابراهیمی

استاد راهنما :

دکتر سیدعلی حسینی

پاییز ۱۴۰۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی های ۹۴ به بعد

شماره: ت = ۵۴۸ / ع =

تاریخ: ۱۴۰۰ / ۸ / ۳

ویرایش:

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای میلاد حاجی ابراهیمی با شماره دانشجویی ۹۷۰۰۲۳۴ رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری تحت عنوان ارزیابی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی حاوی سرباره، پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید علی حسینی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- استاد داور اول	دکتر حسین قاسم زاده طهرانی	استادیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر ایمان آقاییان	دانشیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر عماد محجوبی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به

استوارترین تکیه گاهم، دستان زحمتکش پدرم

سبزترین نگاه زندگیم، چشمان پر مهر مادرم

مهربانترین همراه زندگیم، حضور گرمابخش خواهرم

که هر چه آموخته ام، در مکتب عشق شما بوده و هر چه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

تشکر و قدردانی

استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر سیدعلی حسینی

دلسوزی، تلاش و کوشش حضرت عالی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند در کنار برقراری رابطه صمیمی و دوستانه با دانشجویان و ایجاد فضائی دلنشین برای کسب علم و دانش و درک شرایط دانشجویان حقیقتاً قابل ستایش است. نمی دانم که با چه زبانی و با کدامین واژگان محبتتان را ارج نهم، بی نهایت سپاسگزارم و به راستی انجام این رساله بدون راهنمایی های مدبرانه، نظرهای صائب، پیگیری های دلسوزانه و تشویق های امیدبخش جنابعالی میسر نبود. لطف و مهربانی بی شائبه تان همیشه در خاطرم خواهد ماند.

از خداوند متعال برایتان سلامتی، موفقیت و همواره یاد دادن را مسئلت دارم.

تعهد نامه

اینجانب **میلاد حاجی ابراهیمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته **مهندسی عمران** – راه و ترابری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **ارزیابی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی حاوی سرباره، پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی** تحت راهنمایی **دکتر سیدعلی حسینی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « **دانشگاه صنعتی شاهرود** » و یا « **Shahrood University of Technology** » 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 آنها) 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 افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . 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 نمی باشد.

چکیده:

روسازی بتن غلتکی زیر شاخه ای از روسازی های صلب می باشد. از بارزترین ویژگی های این روسازی ها می توان به مقاومت بالا در سنین ابتدایی، سرعت اجرای بالا و هزینه ی ساخت کمتر نسبت به دیگر روسازی های بتنی اشاره کرد. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از مصالح بازیافتی دور ریز که باعث آلودگی محیط زیست می شوند از قبیل آسفالت بازیافتی، سرباره کوره آهن گدازی و پودرلاستیک به عنوان جایگزین منابع طبیعی تجدید ناپذیر مصالح سنگی استفاده شود. هدف اصلی تحقیق ارائه طرح اختلاطی با ویژگی هایی فراتر از طرح اختلاط با مصالح طبیعی می باشد. به همین منظور با ترکیب مصالح جایگزین و پوشاندن نواقص هر ماده جایگزین با ماده جایگزین دیگر به طرح اختلاط مطلوب دست یافتیم. از نتایج بدست آمده می توان نتیجه گرفت که آسفالت بازیافتی به طور ۱۰۰ درصد می تواند با مصالح طبیعی درشت دانه جایگزین شود. سرباره به طور کامل تاثیر مثبت بر نتایج داشته و جایگزین کردن آن با مصالح طبیعی سودمند است. پودرلاستیک تا ۲۰ درصد قابل جایگزین با مصالح ریزدانه می باشد و در درصدهای بالاتر به حداقل مقاومت فشاری و خمشی نمی رسد. تاثیر منفی پودرلاستیک در عملکرد مخلوط های بتن غلتکی با افزایش درصد سرباره قابل جبران می باشد و می توانیم از این ماده دور ریز به عنوان مصالح سنگی در کنار سرباره استفاده نماییم. لذا سعی است با ترکیب این سه ماده جایگزین به طرح اختلاط نهایی با بیشترین درصد ممکن از مصالح جایگزین با استفاده از مصالح موجود در شهرستان شاهرود دست یابیم. نتایج حاصل از آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم نشان دادند که با جایگزینی ۱۰۰ درصد آسفالت بازیافتی، شاهد کاهش ۱۷/۶۸ و ۱۵/۹۱ درصدی در مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم و افزایش ۲۶ درصدی در مقاومت خمشی هستیم. همچنین با جایگزینی ۲۰ درصد پودرلاستیک، ۲۸/۳ و ۵۸/۲۷ درصد کاهش در مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم و ۳/۴۵ درصد افزایش در مقاومت خمشی رخ داده است. سرباره برعکس این دو ماده زائد در اثر جایگزینی با ۱۰۰ درصد مصالح طبیعی درشت دانه ۵۶ و ۴/۵ درصد افزایش در مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم و ۲/۴۶ درصد کاهش در مقاومت خمشی داشته است. ضعف موجود در پودرلاستیک را با ترکیب پودرلاستیک و سرباره و همچنین ترکیب پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی تا حدودی جبران کردیم. بر این اساس به دو طرح اختلاط بهینه ۱۰۰٪ آسفالت بازیافتی با ۳۰٪ پودرلاستیک و همچنین ۱۰۰٪ سرباره با ۱۵٪ پودرلاستیک دست یافته ایم که می توانند در طرح اختلاط بتن غلتکی استفاده شوند. در نهایت ترکیب سه گانه ۱۰۰٪ آسفالت بازیافتی - ۲۵٪ سرباره و ۱۰٪ پودرلاستیک به عنوان یک نمونه با هر سه ماده جایگزین می تواند پیشنهادی برای استفاده از مواد زائد در طرح اختلاط باشد.

کلمات کلیدی: روسازی بتن غلتکی، طرح اختلاط بهینه، مصالح بازیافتی، آسفالت بازیافتی، پودرلاستیک،

سرباره

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ بیان مساله ۵
- ۳-۱ ضرورت و اهمیت انجام تحقیق ۵
- ۴-۱ اهداف تحقیق ۶
- ۵-۱ روش تحقیق ۶
- ۶-۱ نوآوری ۷
- ۷-۱ ساختار پژوهش ۷

فصل ۲: معرفی روسازی بتن غلتکی و پیشینه علمی موضوع

- بخش اول : معرفی روسازی بتن غلتکی ۱۰
- ۱-۲ روسازی های بتنی(صلب)..... ۱۰
- ۱-۱-۲ انواع روسازی های صلب..... ۱۰
- ۲-۲ روسازی بتن غلتکی..... ۱۰
- ۳-۲ مقایسه روسازی های بتن غلتکی و بتن معمولی ۱۳
- ۴-۲ معایب و مشکلات استفاده از روسازی بتن غلتکی ۱۴
- ۵-۲ راهکارهای جبران ضعف روسازی بتنی..... ۱۴
- ۶-۲ برخی ویژگی های روسازی بتن غلتکی در حالت تازه..... ۱۵
- ۱-۶-۲ کارایی..... ۱۶
- ۲-۶-۲ آب انداختگی..... ۱۷
- ۳-۶-۲ وزن مخصوص و درجه تراکم..... ۱۷

۱۹.....	۲-۶-۴ خواص مکانیکی.....
۱۹.....	۲-۶-۴-۱ مقاومت فشاری.....
۲۲.....	۲-۶-۴-۲ مقاومت خمشی.....
۲۴.....	۲-۶-۴-۳ مقاومت کششی ترک خوردگی.....
۲۴.....	۲-۶-۴-۴ مدول الاستیسیته.....
۲۴.....	۲-۶-۵ جذب آب
۲۵.....	۲-۶-۶ دوام در برابر سولفات ها.....
۲۵.....	۲-۶-۷ دوام در برابر ذوب و یخ.....
۲۵.....	۲-۷ تعیین ضخامت.....
۲۸.....	۲-۸ ساخت روسازی های بتن غلتکی.....
۲۸.....	۲-۸-۱ آماده سازی لایه های اساس و زیراساس.....
۲۹.....	۲-۸-۲ بتن ریزی.....
۳۰.....	۲-۸-۳ تراکم.....
۳۳.....	۲-۹ کاربردهای روسازی بتن غلتکی.....
۳۳.....	۲-۹-۱ کاربرد جهت کف انبارهای سرپوشیده و روباز و محوطه های چوب، الوار و زغال سنگ.....
۳۴.....	۲-۹-۲ روسازی های باراندازها و بندرگاه ها.....
۳۴.....	۲-۹-۳ روسازی های جاده های ویژه وسایل نقلیه سنگین و وسایل نظامی زنجیردار.....
۳۵.....	۲-۹-۴ جاده های با شیب زیاد.
۳۵.....	۲-۹-۵ روسازی راههای با تردد و سرعت کم و خیابان های شهری و بین شهری.....
۳۵.....	۲-۹-۶ پارکینگ اتومبیل ها و راه های تردد داخلی سازمانها.....
۳۶.....	۲-۹-۷ فرودگاه ها.....
۳۷.....	بخش دوم : پیشینه علمی موضوع.....

- ۲-۱۰ پژوهش های انجام شده با استفاده از پودر لاستیک در روسازی بتن غلتکی..... ۴۰
- ۲-۱۱ پژوهش های انجام شده با استفاده از آسفالت بازیافتی در روسازی بتن غلتکی..... ۴۶
- ۲-۱۲ پژوهش های انجام شده با استفاده از سرباره در روسازی..... ۵۳

فصل ۳: طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی

- ۳-۱ مصالح مصرفی در بتن غلتکی..... ۷۱
- ۳-۱-۱ سنگدانه..... ۷۲
- ۳-۱-۲ مصالح چسبنده..... ۷۳
- ۳-۱-۳ آب..... ۷۴
- ۳-۱-۴ افزودنی ها..... ۷۵
- ۳-۲ تعیین نسبت های طرح اختلاط..... ۷۵
- ۳-۲-۱ دیدگاه بتنی..... ۷۶
- ۳-۲-۱-۱ تعیین طرح اختلاط با دیدگاه بتنی..... ۷۸
- ۳-۲-۱-۲ مراحل گام به گام روش طرح اختلاط بر پایه کارایی بهینه بتن..... ۷۸
- ۳-۲-۲ طرح اختلاط با استفاده از دیدگاه خاکی..... ۸۱
- ۳-۲-۲-۱ مراحل گام به گام روش طرح اختلاط بر پایه دیدگاه خاکی..... ۸۲
- ۳-۲-۲ High paste روش..... ۸۲
- ۳-۲-۴ روش عددی (مدل اجسام معلق)..... ۸۳
- ۳-۳ اصول طراحی..... ۸۳

فصل ۴: طرح اختلاط نمونه ها و نحوه ساخت

- ۴-۱ مشخصات مصالح مصرفی..... ۸۶
- ۴-۱-۱ درشت دانه..... ۸۶

۸۷.....	۲-۱-۴ ریزدانه.....
۸۷	۳-۱-۴ مصالح چسبنده(سیمان)
۸۸.....	۴-۱-۴ سرباره.....
۸۹.....	۵-۱-۴ پودر لاستیک.....
۸۹.....	۶-۱-۴ آسفالت بازیافتی.....
۸۹.....	۲-۴ تعیین درصد رطوبت بهینه.....
۹۲.....	۱-۲-۴ تعیین درصد رطوبت بهینه در آزمایشگاه.....
۹۷.....	۲-۲-۴ قالب پروکتور.....
۱۰۰.....	۳-۲-۴ دستگاه تراکم.....
۱۰۲.....	۴-۲-۴ رسم نمودار درصد رطوبت- وزن مخصوص خشک.....
۱۰۳.....	۳-۴ تعیین چگالی و چگالی نسبی و درصد جذب آب.....
۱۰۳.....	۱-۳-۴ تعیین چگالی و چگالی نسبی درصد جذب آب مصالح درشت دانه.....
۱۰۵.....	۲-۳-۴ تعیین چگالی و چگالی نسبی ظاهری و واقعی ریزدانه و میزان جذب رطوبت در حالت SSD
۱۰۷.....	۳-۳-۴ محاسبات مرتبط با چگالی و درصد جذب آب.....
۱۰۹.....	۴-۴ ساخت بتن.....
۱۰۹.....	۱-۴-۴ روغن کاری قالبها.....
۱۱۰.....	۲-۴-۴ ساخت نمونه های اصلی.....
۱۱۱.....	۳-۴-۴ مراحل اختلاط بتن.....
۱۱۴.....	۴-۴-۴ روش عمل آوری نمونه ها.....
۱۱۴.....	۵-۴-۴ ساخت نمونه مقاومت فشاری و نمونه مقاومت کششی غیرمستقیم.....
۱۱۷.....	۶-۴-۴ ساخت نمونه های مقاومت خمشی.....
۱۲۱.....	۷-۴-۴ ساخت نمونه های پژوهش با مصالح جایگزین.....

فصل ۵ : نحوه انجام آزمایش ها و بیان نتایج

- ۱-۵ آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۰
- ۲-۵ نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۳
- ۱-۲-۵ تاثیر پودرلاستیک بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۳
- ۲-۲-۵ تاثیر آسفالت بازیافتی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۴
- ۳-۲-۵ تاثیر سرباره بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۶
- ۴-۲-۵ تاثیر ترکیب پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۷
- ۵-۲-۵ تاثیر ترکیب سرباره و آسفالت بازیافتی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۸
- ۶-۲-۵ تاثیر ترکیب سرباره و پودرلاستیک بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۱۳۹
- ۷-۲-۵ تاثیر ترکیب سه گانه سرباره، پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی ۱۴۰
- ۳-۵ آزمایش مقاومت خمشی ۱۴۲
- ۴-۵ نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۱۴۵
- ۱-۴-۵ تاثیر پودرلاستیک بر مقاومت خمشی ۱۴۵
- ۲-۴-۵ تاثیر آسفالت بازیافتی بر مقاومت خمشی ۱۴۶
- ۳-۴-۵ تاثیر سرباره بر مقاومت خمشی ۱۴۷
- ۴-۴-۵ تاثیر ترکیب پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی بر مقاومت خمشی ۱۴۸
- ۵-۴-۵ تاثیر ترکیب سرباره و آسفالت بازیافتی بر مقاومت خمشی ۱۴۹
- ۶-۴-۵ تاثیر ترکیب سرباره و پودرلاستیک بر مقاومت خمشی ۱۵۰
- ۷-۴-۵ تاثیر ترکیب سه گانه سرباره، پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی بر مقاومت خمشی ۱۵۱
- ۵-۵ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ۱۵۴
- ۶-۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ۱۵۶
- ۱-۶-۵ تاثیر پودرلاستیک بر مقاومت کششی ۱۵۶

۱۵۷.....	۲-۶-۵ تاثیر آسفالت بازیافتی بر مقاومت کششی
۱۵۸.....	۳-۶-۵ تاثیر سرباره بر مقاومت کششی
۱۵۹.....	۴-۶-۵ تاثیر ترکیب پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی بر مقاومت کششی
۱۶۰.....	۵-۶-۵ تاثیر ترکیب سرباره و آسفالت بازیافتی بر مقاومت کششی
۱۶۱.....	۶-۶-۵ تاثیر ترکیب سرباره و پودرلاستیک بر مقاومت کششی
۱۶۲.....	۷-۶-۵ تاثیر ترکیب سه گانه سرباره، پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی بر مقاومت کششی
۱۶۵.....	۷-۵ نتیجه گیری
۱۶۷.....	۸-۵ پیشنهاد ها جهت انجام تحقیقات آینده
۱۶۹.....	مراجع

جداول

- جدول ۱-۲ مقایسه طرح اختلاط روسازی های ساخته شده با بتن غلتکی و بتن معمولی.....۱۳
- جدول ۲-۲ طرح اختلاط مربوط به چند روسازی بتن غلتکی.....۱۳
- جدول ۳-۲ مقاومت فشاری نمونه های مغزه گرفته شده از پروژه های کانادا.....۲۲
- جدول ۴-۲ مقاومت فشاری نمونه های مغزه گرفته شده از پروژه های امریکا.....۲۲
- جدول ۵-۲ مقاومت خمشی و کشش ترک خوردگی بدست آمده از پروژه های آمریکا.....۲۳
- جدول ۶-۲ مقادیر شاخص طراحی ارائه شده توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا.....۲۷
- جدول ۱-۳ درصد حجمی درشت دانه در واحد حجم بتن.....۸۰
- جدول ۱-۴ مشخصات سیمان استفاده شده در پژوهش.....۸۸
- جدول ۲-۴ ترکیب شیمیایی سرباره.....۸۹
- جدول ۳-۴ دانه بندی بهینه سنگدانه ها.....۹۰
- جدول ۴-۴ آزمایش تراکم.....۹۱
- جدول ۵-۴ دانه بندی انتخابی پژوهش بر اساس محدوده دانه بندی ACI.....۹۲
- جدول ۶-۴ درصد های مختلف آب برای ساخت نمونه به منظور رسیدن به درصد رطوبت بهینه.....۹۴
- جدول ۷-۴ جزییات دانه بندی درصد رطوبت ۵ درصد و وزن مانده روی هر الک.....۹۵
- جدول ۸-۴ وزن نهایی روی هر الک برای درصد رطوبت ۶ و ۷ درصد.....۹۵
- جدول ۹-۴ وزن نهایی روی هر الک برای درصد رطوبت ۸ و ۱۰ درصد.....۹۶
- جدول ۱۰-۴ محاسبه وزن مخصوص مرطوب و خشک برای درصد رطوبت های مختلف.....۱۰۲
- جدول ۱۱-۴ محاسبات مربوط به چگالی مصالح طبیعی درشت دانه.....۱۰۷
- جدول ۱۲-۴ محاسبات مربوط به چگالی آسفالت بازیافتی.....۱۰۷
- جدول ۱۳-۴ محاسبات مربوط به چگالی سرباره.....۱۰۸
- جدول ۱۴-۴ محاسبات مربوط به چگالی مصالح طبیعی ریزدانه.....۱۰۸

جدول ۴-۱۵ درصد مانده روی هر الک.....	۱۱۱
جدول ۴-۱۶ محاسبه اضافه بار بر نمونه استاندارد.....	۱۱۲
جدول ۴-۱۷ محاسبه اضافه بار بر نمونه استوانه و تیر.....	۱۱۳
جدول ۴-۱۸ روابط مرتبط با محاسبه وزن مصالح طبیعی نمونه استوانه.....	۱۱۵
جدول ۴-۱۹ درصد وزنی مصالح طبیعی نمونه استوانه.....	۱۱۶
جدول ۴-۲۰ روابط مرتبط با محاسبه وزن مصالح طبیعی نمونه تیر.....	۱۱۸
جدول ۴-۲۱ درصد وزنی مصالح طبیعی نمونه تیر.....	۱۱۹
جدول ۴-۲۲ وزن مخصوص نسبی مصالح جایگزین.....	۱۲۱
جدول ۴-۲۳ درصد جذب.....	۱۲۱
جدول ۴-۲۴ نام اختصاری نمونه ها.....	۱۲۲
جدول ۴-۲۵ درصد وزنی مصالح نمونه استوانه ای.....	۱۲۳
جدول ۴-۲۶ درصد حجمی مصالح نمونه استوانه ای.....	۱۲۳
جدول ۴-۲۷ آب اضافی نمونه استوانه.....	۱۲۴
جدول ۴-۲۸ درصد وزنی مصالح نمونه تیری.....	۱۲۴
جدول ۴-۲۹ درصد حجمی مصالح نمونه تیری.....	۱۲۵
جدول ۴-۳۰ آب اضافی نمونه تیری.....	۱۲۵
جدول ۴-۳۱ نمونه های ساخته شده در پژوهش.....	۱۲۷
جدول ۵-۱ تبدیل نوع سیمان و سن بتن بر روی مقاومت فشاری نسبی بتن	۱۳۱
جدول ۵-۲ مقاومت فشاری و مدول پودر لاستیک.....	۱۳۳
جدول ۵-۳ مقاومت فشاری و مدول آسفالت بازیافتی.....	۱۳۵
جدول ۵-۴ مقاومت فشاری و مدول سرباره.....	۱۳۶
جدول ۵-۵ مقاومت فشاری و مدول نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی.....	۱۳۷

- جدول ۵-۶ مقاومت فشاری و مدول نمونه ترکیبی سرباره آسفالت بازیافتی..... ۱۳۸
- جدول ۵-۷ مقاومت فشاری و مدول نمونه ترکیبی سرباره پودر لاستیک..... ۱۳۹
- جدول ۵-۸ مقاومت فشاری و مدول سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۰
- جدول ۵-۹ مقاومت فشاری و مدول سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۱
- جدول ۵-۱۰ مقاومت فشاری و مدول سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۲
- جدول ۵-۱۱ مقاومت خمشی پودر لاستیک..... ۱۴۵
- جدول ۵-۱۲ مقاومت خمشی آسفالت بازیافتی..... ۱۴۷
- جدول ۵-۱۳ مقاومت خمشی سرباره..... ۱۴۸
- جدول ۵-۱۴ مقاومت خمشی نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۹
- جدول ۵-۱۵ مقاومت خمشی نمونه ترکیبی سرباره آسفالت بازیافتی..... ۱۵۰
- جدول ۵-۱۶ مقاومت خمشی نمونه ترکیبی سرباره پودر لاستیک..... ۱۵۱
- جدول ۵-۱۷ مقاومت خمشی سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۲
- جدول ۵-۱۸ مقاومت خمشی سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۳
- جدول ۵-۱۹ مقاومت خمشی سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۴
- جدول ۵-۲۰ مقاومت کششی غیرمستقیم پودر لاستیک..... ۱۵۶
- جدول ۵-۲۱ مقاومت کششی غیرمستقیم آسفالت بازیافتی..... ۱۵۷
- جدول ۵-۲۲ مقاومت کششی غیرمستقیم سرباره..... ۱۵۸
- جدول ۵-۲۳ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۹
- جدول ۵-۲۴ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ترکیبی سرباره آسفالت بازیافتی..... ۱۶۰
- جدول ۵-۲۵ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ترکیبی سرباره پودر لاستیک..... ۱۶۱
- جدول ۵-۲۶ مقاومت کششی غیرمستقیم سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۶۲
- جدول ۵-۲۷ مقاومت کششی غیرمستقیم سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۶۳

جدول ۲۸-۵ مقاومت کششی غیرمستقیم سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی.....۱۶۴

اشکال

- شکل ۱-۱ رویه آسفالتی معمولی..... ۲
- شکل ۲-۱ رویه تمام آسفالتی..... ۳
- شکل ۳-۱ سطح و شدت تنش در روسازی های صلب و انعطاف پذیر..... ۵
- شکل ۱-۲ مقایسه درصد مصالح تشکیل دهنده بتن غلتکی و بتن معمولی..... ۱۱
- شکل ۲-۲ مقایسه درصد مصالح ریز و درشت در بتن غلتکی و معمولی..... ۱۱
- شکل ۳-۲ مقایسه انواع بتن از نظر روانی و درصد سیمان..... ۱۲
- شکل ۴-۲ دستگاه اندازه گیری کارایی بتن غلتکی بروش وی بی اصلاح شده..... ۱۶
- شکل ۵-۲ رابطه وزن مخصوص - درصد رطوبت برای بتن غلتکی..... ۱۸
- شکل ۶-۲ تاثیر درجه تراکم بر روی مقاومت چند طرح اختلاط بتن غلتکی..... ۱۸
- شکل ۷-۲ تاثیر درجه تراکم بر روی مقاومت فشاری بتن غلتکی..... ۱۹
- شکل ۸-۲ رابطه مقاومت فشاری مخلوط با نسبت آب به سیمان و درصد رطوبت..... ۲۱
- شکل ۹-۲ نمودار طراحی شده توسط انجمن سیمان پرتلند..... ۲۶
- شکل ۱۰-۲ نمونه طراحی ارائه شده گروه مهندسين ارتش آمريکا..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲ سیستم تولید پیوسته بتن غلتکی..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲ نحوه اجرای درز تازه در روسازی بتن غلتکی..... ۳۱
- شکل ۱۳-۲ نحوه اجرای درز سرد در روسازی بتن غلتکی..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲ نحوه اجرای درزهای طولی ۳۲
- شکل ۱۵-۲ روسازی بتن غلتکی در ترمینال باری تگزاس..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲ مقایسه ضخامت طراحی روسازی در فرودگاه پرتلند..... ۳۶
- شکل ۱-۳ چسبندگی و شل بودن مخلوط تازه..... ۷۲
- شکل ۲-۳ دستگاه وی بی اصلاح شده..... ۷۷

- شکل ۳-۳ رابطه بین مقاومت فشاری و نسبت آب به مواد سیمانی بازای مقادیر مختلف پوزولان..... ۷۹
- شکل ۴-۱ نمونه دانه بندی درشت دانه..... ۸۶
- شکل ۴-۲ نمونه دانه بندی ریزدانه..... ۸۷
- شکل ۴-۳ محدوده دانه بندی استفاده شده در طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی..... ۹۲
- شکل ۴-۴ دستگاه لرزاننده و الکهای قرار داده شده..... ۹۶
- شکل ۴-۵ الک های خارج شده از دستگاه لرزاننده..... ۹۷
- شکل ۴-۶ قالب پروکتور..... ۹۷
- شکل ۴-۷ دستگاه اوون..... ۹۸
- شکل ۴-۸ مصالح وزن شده ۹۸
- شکل ۴-۹ مخلوط مصالح بتن غلتکی برای درصد رطوبت بهینه..... ۹۹
- شکل ۴-۱۰ میکسر..... ۹۹
- شکل ۴-۱۱ مخلوط نهایی بتن غلتکی..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۲ دستگاه تراکم..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۳ مخلوط در حال متراکم شده..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۴ مخلوط نهایی دستگاه تراکم..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۵ نمودار درصد رطوبت بهینه..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۶ وزن مصالح غوطه ور در آب..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۷ ماسه SSD..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۸ روغن کاری قالبها..... ۱۱۰
- شکل ۴-۱۹ دستگاه وی بی..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۰ وزن سربار نمونه استوانه..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۱ وزن سربار نمونه تیری..... ۱۱۳

- شکل ۴-۲۲ قالب نمونه استوانه..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۳ مخلوط نهایی نمونه استوانه..... ۱۱۶
- شکل ۴-۲۴ نمونه استوانه بتن غلتکی..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۵ قالب نمونه تیر..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۶ مخلوط نهایی نمونه تیر..... ۱۱۹
- شکل ۴-۲۷ نمونه تیری بتن غلتکی..... ۱۲۰
- شکل ۴-۲۸ نمونه های ساخته شده تیر و استوانه..... ۱۲۶
- شکل ۵-۱ نمونه عمل آوری شده استوانه..... ۱۳۱
- شکل ۵-۲ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری..... ۱۳۲
- شکل ۵-۳ نمونه استوانه ای پس از آزمایش مقاومت فشاری..... ۱۳۲
- شکل ۵-۴ نمودار مقاومت فشاری پودر لاستیک..... ۱۳۴
- شکل ۵-۵ نمودار مقاومت فشاری آسفالت بازیافتی..... ۱۳۵
- شکل ۵-۶ نمودار مقاومت فشاری سرباره..... ۱۳۶
- شکل ۵-۷ نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۳۷
- شکل ۵-۸ نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی سرباره و آسفالت بازیافتی..... ۱۳۸
- شکل ۵-۹ نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی سرباره و پودر لاستیک..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۰ نمودار مقاومت فشاری سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۰
- شکل ۵-۱۱ نمودار مقاومت فشاری سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۱
- شکل ۵-۱۲ نمودار مقاومت فشاری سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۲
- شکل ۵-۱۳ سیستم دستگاه آزمایش مقاومت خمشی..... ۱۴۳
- شکل ۵-۱۴ دستگاه مقاومت خمشی بتن..... ۱۴۳
- شکل ۵-۱۵ شکست تیر بتنی در دستگاه بتنی..... ۱۴۴

- شکل ۵-۱۶ نمودار مقاومت خمشی پودر لاستیک..... ۱۴۶
- شکل ۵-۱۷ نمودار مقاومت خمشی آسفالت بازیافتی..... ۱۴۷
- شکل ۵-۱۸ نمودار مقاومت خمشی سرباره..... ۱۴۸
- شکل ۵-۱۹ نمودار مقاومت خمشی نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۴۹
- شکل ۵-۲۰ نمودار مقاومت خمشی نمونه ترکیبی سرباره و آسفالت بازیافتی..... ۱۵۰
- شکل ۵-۲۱ نمودار مقاومت خمشی نمونه ترکیبی سرباره و پودر لاستیک..... ۱۵۱
- شکل ۵-۲۲ نمودار مقاومت خمشی سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۲
- شکل ۵-۲۳ نمودار مقاومت خمشی سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۳
- شکل ۵-۲۴ نمودار مقاومت خمشی سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۵۴
- شکل ۵-۲۵ نمای شماتیک آزمایش شکست برزلی..... ۱۵۵
- شکل ۵-۲۶ شکست نمونه استوانه ای در دستگاه کشش غیرمستقیم..... ۱۵۶
- شکل ۵-۲۷ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم پودر لاستیک..... ۱۵۷
- شکل ۵-۲۸ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم آسفالت بازیافتی..... ۱۵۸
- شکل ۵-۲۹ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم سرباره..... ۱۵۹
- شکل ۵-۳۰ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۶۰
- شکل ۵-۳۱ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ترکیبی سرباره و آسفالت بازیافتی..... ۱۶۱
- شکل ۵-۳۲ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ترکیبی سرباره و پودر لاستیک..... ۱۶۲
- شکل ۵-۳۳ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۶۳
- شکل ۵-۳۴ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۶۴
- شکل ۵-۳۵ نمودار مقاومت کششی غیرمستقیم سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی..... ۱۶۵

فصل اول :

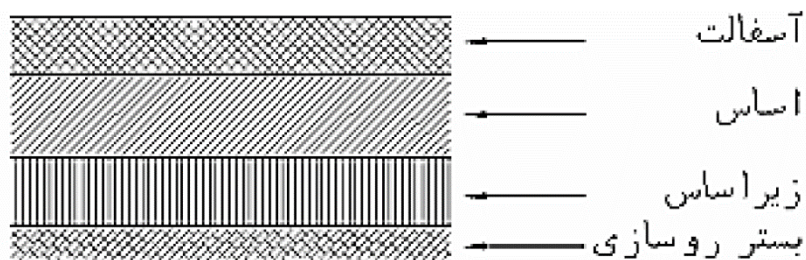
کلیات موضوع

۱-۱ مقدمه :

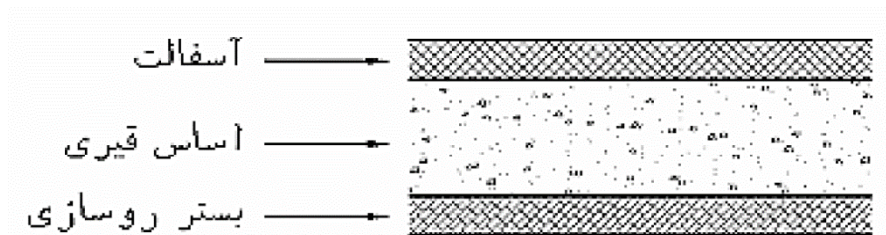
بازسازی و گسترش زیرساخت های حمل و نقل برای توسعه اقتصادی ، اجتماعی در سطح منطقه ای، ملی و همچنین بین المللی ضروری است که عنصر اصلی زیرساخت های حمل و نقل سطحی، روسازی است. عملکرد ضعیف روسازی های آسفالتی در شرایط آب و هوایی مختلف، فرسوده شدن سریع رویه از جمله ایجاد ترک و ناهمواری های سطحی و به تبع آن ضرورت نگهداری و تعویض لایه ی سطحی و غیر اقتصادی بودن این نوع روسازی نسبت به روسازیهای بتنی در مدت طول عمر، باعث شده است که مهندسان بیش از پیش در تلاش برای یافتن بهترین نوع روسازی بتنی باشند. از طرف دیگر در دسترس بودن مصالح، سازگاری با محیط زیست، عدم نیاز به تکنولوژی های پیشرفته و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری زیاد روسازیهای بتنی که هم دارای مقاومت خوبی جهت تامین لایه ی صلب بوده و هم دارای سطحی با اصطکاک زیاد باشد، مورد استفاده قرار گیرد .

روسازی های انعطاف پذیر که شامل انواع روسازی های آسفالتی و شنی می باشند، مقاومت برشی مناسبی دارند ولی مقاومت کششی آنها بسیار کم است. بارهای وارده بر روسازی آسفالتی در سطح نسبتاً کوچکتر و با شدت بیشتری نسبت به روسازی بتنی به خاک بستر روسازی منتقل می شوند. در روسازی آسفالتی، معمولاً از سه لایه متمایز زیراساس، اساس و آسفالت استفاده می شود. مقاومت و کیفیت خاک بستر در پایداری روسازی آسفالتی، نقش تعیین کننده ای دارد.

روسازی تمام آسفالتی نیز یکی از انواع روسازیهای انعطاف پذیر است که در آن فقط از لایه های آسفالتی که مستقیماً روی بستر روسازی و یا بستر تقویت شده قرار می گیرد، استفاده می شود. روسازیهای تمام آسفالتی، عمر طولانی دارند و صرفاً برای مناطق مرطوب با یخبندان زیاد می تواند کاربرد داشته باشند. تیپ عرضی روسازی انعطاف پذیر در حالت معمولی و یا تمام آسفالتی در شکل های ۱-۱ و ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ : رویه آسفالتی معمولی



شکل ۱-۲: رویه تمام آسفالتی

با توجه به مشکلات روسازی های آسفالتی در محورهای سنگین که اغلب دارای ناهمواری ها، موج های بلند و متوالی و گاه شکستگی می باشند، کاربرد یک دال بتنی به عنوان یک لایه مقاوم و با دوام باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش زمان تعمیرات خواهد شد. از بتن سیمانی پرتلند برای روسازی های صلب استفاده می شود. یکی از انواع روسازی های بتنی، روسازی بتن غلتکی است که زیرشاخه روسازی های بتنی غیرمسلح درزدار می باشد. کاربرد بتن غلتکی RCCP در راهسازی یک ایده نوین و در حال توسعه است که اولین بار توسط پیگات آدر دهه ۱۹۷۰ در کشور کانادا بدون هیچگونه قالب بندی و آرماتورگذاری بطور موفقیت آمیز اجرا و بهره برداری گردید.

براساس ACI116^۳ به بتن بدون اسلامپ که قبل از گیرش توانایی تحمل غلتکهای متراکم کننده را داشته باشد، بتن غلتکی گویند [۱]. این نامگذاری به دلیل استفاده از غلتک در تراکم این نوع بتن می باشد. با توجه به حساسیت بسیار بالای بتن غلتکی نسبت به آب، اگر رطوبت آن بیش از رطوبت بهینه باشد، بتن براق بنظر رسیده و رد غلتک بر روی آن باقی می ماند. همچنین اگر رطوبت بتن کمتر از رطوبت بهینه باشد، بتنی شبیه خاک بوجود می آید. بتن غلتکی با اصول مربوط به ساخت سازه های خاک-سیمان و انواع دیگر سازه های خاکی در محل اجرا می شود که این ویژگی باعث تسریع در ساخت و سازه های مربوطه می گردد [۲]. سازه های ساخته شده با بتن غلتکی با توجه به تشابه ساخت و عملکرد سازه ای به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

الف - سازه های تک لایه که بیشتر در ساخت روسازی ها و کف های بتنی استفاده می گردد. به این گروه از سازه ها، روسازی های بتن غلتکی گویند که ممکن است این سازه ها در بیش از یک لایه بتن ریزی و متراکم شوند؛ اما به دلیل عملکرد تک لایه پس از گیرش جزو گروه تک لایه طبقه بندی می شوند.

^۱ Roller compacted concrete pavement

^۲ Piggott

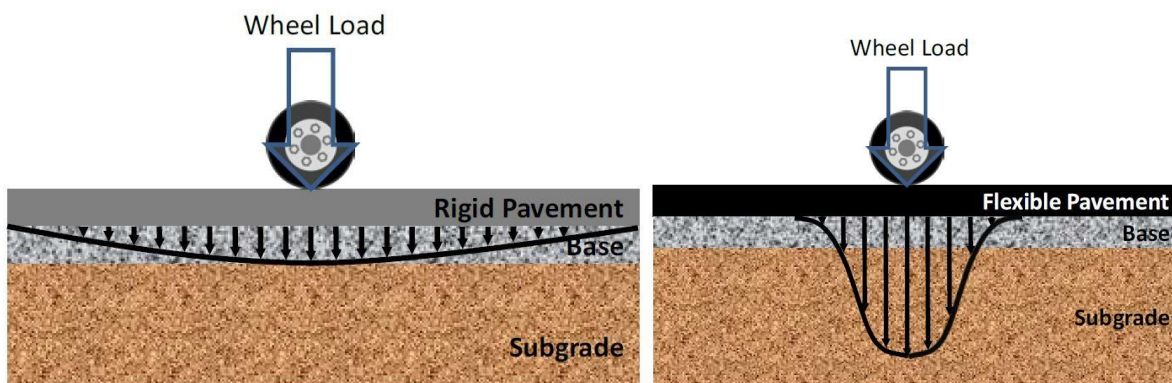
^۳ American Concrete Institute

ب- سازه های چند لایه که بیشتر در ساخت سدهای وزنی و سازه های جانبی بکار می روند. براین اساس، این دسته را با عنوان سدهای بتن غلتکی می شناسند.

از پارامترهای مهم در سازه هایی که در بیش از یک لایه اجرا می شوند، مقاومت چسبندگی بین لایه ای آن می باشد. مقاومت چسبندگی مشخص می کند که آیا روسازی ساخته شده با بتن غلتکی را می توان به صورت یک لایه منفرد در نظر گرفت، یا اینکه لایه ها با چسبندگی جزئی و یا بدون چسبندگی عمل می کنند. مقدار حداقل نسبت مقاومت چسبندگی بین دو لایه بتن غلتکی به مقاومت کششی بتن در خود لایه ها ۵۰٪ توصیه می شود [۳]. لازم به ذکر است که تکنولوژی روسازی بتن غلتکی به عنوان یک فناوری در حال رشد و توسعه محسوب شده و کشورهای مختلف دنیا در زمینه های مختلف این نوع روسازی در حال انجام کارهای تحقیقاتی می باشند. یکی از اساسی ترین تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته است، در نظر گرفتن تمهیداتی جهت تسلیح خمشی بتن غلتکی روسازی است؛ زیرا با توجه به شکل خاص اجرا، این نوع بتن قابلیت آرماتورگذاری ندارد.

یکی از ویژگی های مهم روسازی های بتنی، میزان مقاومت برشی و سختی خمشی آنها در برابر بارهای اعمال شده است. این روسازی ها، بارهای خارجی اعمال شده را در سطح وسیعتری نسبت به روسازی های انعطاف پذیر (روسازی های بتن آسفالتی) به خاک بستر منتقل می کنند. از طرفی روسازی های بتنی در جاده هایی با حجم ترافیک بالا و سنگین، تونلها، پل ها، اسکله ها و یا در بارگذاری های سریع و مقطعی مانند فرودگاهها، پارکینگها، ایستگاه های عوارضی، گاراژهای کف کارخانجات و... استفاده قابل ملاحظه ای دارند.

روسازی های بتنی دارای هزینه های اولیه ی ساخت نسبتاً بالایی بوده لیکن باید توجه داشت که در صورت لحاظ نمودن تمهیدات لازم جهت مهار تنشهای اصطکاکی، از عمر مناسب و هزینه های نگهداری به مراتب کمتر از روسازیهای آسفالتی برخوردار می باشد، لذا توجیه اقتصادی خواهند داشت. همانگونه که اشاره شد، شدت تنش اعمال شده از روسازیهای بتنی به خاک بستر نسبت به روسازی آسفالتی به مراتب کمتر است (شکل ۱-۳)، لذا مواردی که خاک بستر از مقاومت و مشخصات فنی پایین تری برخوردار بوده و اصلاح و جایگزینی آن توجیه فنی و اقتصادی نداشته باشد، روسازی های بتنی نقش کاربردی خود را نشان خواهند داد.



شکل ۱-۳: سطح و شدت تنش در روسازی های صلب و انعطاف پذیر

۲-۱ بیان مساله

افزایش قیمت قیر و به دنبال آن افزایش چند برابری هزینه تولید آسفالت، مشکلات حمل و دپوی قیر و مشکلات ناشی از ادوات و روش تولید، حمل و اجرای آسفالت گرم در کشور و مقاومت مکانیکی کم در تحمل فشار و کشش بار ترافیکی، چسبندگی و مشکلات زیست محیطی ما را به یافتن روشی جایگزین برای روسازی آسفالتی راهها سوق می دهد. یکی از مشکلات اساسی روسازی های آسفالتی، فرسوده شدن سریع و ضرورت تعویض رویه می باشد که بسیار هزینه بر است و همچنین ایجاد ناهمواری های سطح آسفالتی نارضایتی رانندگان را به دنبال دارد. از طرفی مزایایی چون هزینه تعمیر و نگهداری کمتر، عمر مفید بیشتر، ضخامت روسازی کمتر و تخریب منابع طبیعی و زیست محیطی کمتر بدلیل صرفه جویی در بکارگیری مصالح در لایه های بتنی، روسازی های بتنی را برتر از روسازی های آسفالتی کرده است. در میان انواع روسازی های بتنی، روسازی بتن غلتکی بدلیل مسلح نبودن و هزینه ساخت پایین تر، نیاز نداشتن به دستگاه خاصی برای ساخت و اجرایی آسان با حداقل کارگر خود را متمایز کرده است. روسازی های بتن غلتکی همانند دیگر روسازیها امکان اجرا با مصالح بازیافتی و عدم ایجاد مشکلات زیست محیطی را دارا می باشند. امروزه مسائل زیست محیطی در ایران به ویژه در مناطق شهری خطری جدی محسوب می گردد. ایران سالانه بیش از ۸ میلیون تن مواد زائد تولید می کند. حال با توجه به امکان استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی بتن غلتکی به جهت کمک به مسائل زیست محیطی و ایجاد روسازی سازگار با محیط زیست در این پژوهش به دنبال بررسی ارائه طرح اختلاطی از روسازی بتن غلتکی شامل مصالح بازیافتی می باشیم.

۳-۱ ضرورت و اهمیت انجام تحقیق

پس از استفاده موفقیت آمیز از بتن غلتکی در سدسازی و همچنین ویژگی ها و مزایای دیگر آن از جمله دوام و امکان بارگذاری بیشتر روسازی در مواجهه با تردد وسایل سنگین، حذف خرابی شیارشدگی، عریان شدگی و چاله ها، کاهش ترک های انقباضی به دلیل نسبت کم آب به سیمان نسبت به دیگر روسازی های بتنی، حساسیت کمتر بتن نسبت به مواد شیمیایی مانند بنزین و گازوئیل و مواد خورنده، نداشتن مشکلات ناشی از نشست، بهره وری کامل از مصالح طبیعی در دسترس و منابع قرضه محلی امکان استفاده در مناطق سردسیر (بدلیل مقاومت

بالا در برابر چرخه ذوب و یخ)، کاهش نیاز به روشنایی بدلیل روشن بودن سطح روسازی و مزایای زیست محیطی (کاهش گاز گلخانه ای) کارشناسان را به استفاده از این نوع بتن در روسازی راهها ترغیب کرده است. در کشور ما نیز با توجه به فزونی ظرفیت تولید انواع سیمان نسبت به مجموع نیاز پروژههای عمرانی داخلی و تقاضای بازارهای صادراتی، گسترش استفاده از رویه های بتنی در راهها به عنوان راهکاری عملی جهت ایجاد بازار مصرف پایدار برای بخشی از سیمان تولید شده مطرح می باشد [۱].

در ایران، آسفالت بازیافت شده RAP تا حدی برای روسازی قیری مورد استفاده قرار می گیرد، اما بخش باقیمانده آن مورد استفاده قرار نمی گیرد و به مناطق متروکه فرستاده می شود و این منجر به ایجاد مشکلات زیست محیطی می شود. همچنین لاستیک بعنوان یک زباله ای مضر در طبیعت تا سالها باقی می ماند. علاوه بر این، RAP و لاستیک دارای انعطاف پذیری کمی بالاتر از سنگدانه ها هستند که می توانند هنگام استفاده از آنها به عنوان مواد زائد، بر خاصیت ترکیبی مخلوط تأثیر بگذارند. با این حال، این مواد دارای عوارض جانبی هستند که احتمالاً با استفاده از مواد افزودنی حل می شوند. انتشار ترک و شاخص چقرمگی از عواملی اساسی هستند که با استفاده از این زباله ها قابل بهبود هستند. اگرچه رفتار استحکام مخلوط با اضافه کردن مواد زائد به طور معکوس تحت تأثیر قرار می گیرد، اما خواص دیگر مانند چقرمگی و انتشار مسیر ترک را بهبود می بخشد. سرباره نیز به عنوان محصول مصنوعی و جانبی به هنگام جداسازی آهن در کوره از ناخالصی های موجود در سنگ آهن بوجود می آید. در فرایند تولید فولاد کاهش و حذف سرباره ناممکن است، در نتیجه بازیافت سرباره از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این ماده در طبقه بندی مدیریت پسماند سازمان حفاظت محیط زیست به عنوان یک پسماند صنعتی غیر خطرناک شناخته شده است.

۴-۱ اهداف تحقیق

با توجه به وجود مواد زائدی از قبیل پودر لاستیک، سرباره و آسفالت بازیافتی برآن شدیم تا با استفاده از مصالح معادن شهرستان شاهرود، اقدام به بررسی طرح اختلاطی بهینه، مختص معدن موردنظرکنیم، سپس مشخصات مکانیکی بتن غلتکی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی برزیلی، مقاومت خمشی ارزیابی خواهد شد. تا حدامکان سعی بر استفاده از مواد زائد و عوامل تخریب کننده محیط زیست بعنوان جایگزین بخشی از رکن های ساخت بتن غلتکی شده است. حال هدف نهایی ارائه یک طرح اختلاط بهینه با استفاده از ترکیب این سه ماده می باشد.

۵-۱ روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا درصد رطوبت بهینه تعیین گردید. سپس به تعیین طرح اختلاط مورد نظر بر اساس نشریه ۷۳۱ (دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها) پرداخته شد و طرح اختلاط بروش تراکم خاک تعیین شد. این روش شامل استفاده از منحنی درصد رطوبت-چگالی خشک می باشد. نمونه های موردنظر بعد از ساخته شدن در میکسر با استفاده از میز وی بی و اضافه بار اعمالی متراکم گردیدند و پس از بازشدن قالبها در

حوضچه آب عمل آوری شدند. مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم براساس استاندارد های مربوطه آزمایش شدند و با مقایسه نتایج و تحلیل آنها طرح اختلاطی بهینه با مواد جایگزین معرفی گردیده است.

۱-۶ نوآوری

مصالح و مواد زائدی از قبیل پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی و سرباره که تاکنون در روسازی بتن غلتکی بصورت مجزا استفاده شده است ولی درصد استفاده از هرکدام در طرح اختلاط محدود بوده است. در این پژوهش توانستیم با استفاده طرح اختلاطی که ارائه کردیم، درصد استفاده از مصالح جایگزین را بالا ببریم، برای مثال در طرح اختلاط ارائه شده می توان ۱۰۰ درصد درشت دانه را با آسفالت بازیافتی جایگزین کرد و حداقل مقاومت های مورد نیاز را بدست آورد. همچنین طرح اختلاطی با ترکیب مصالح جایگزین، پودرلاستیک، آسفالت بازیافتی و سرباره بصورت دو به دو و در نهایت طرح اختلاطی شامل هرسه مصالح مورد نظر که تاکنون کار نشده است، ارائه و نتیجه گیری شد.

۱-۷ ساختار پژوهش

ساختار فصل های پایان نامه به صورت زیر می باشد:

در فصل اول مقدمه ای از روسازیها و ضرورت استفاده از انواع مختلف آنها ذکر شده است. همچنین در این فصل ضرورت تحقیق، اهداف تحقیق، نوآوری و شیوه انجام آن ارائه شده است. در فصل دوم بصورت کامل روسازی های بتنی بخصوص روسازی بتن غلتکی معرفی شده و پیشینه علمی موضوع توضیح داده می شود. فصل سوم به معرفی طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی پرداخته است. در فصل چهارم طرح اختلاط نمونه ها و نحوه ساخت و کارهای آزمایشگاهی بیان شده اند. در نهایت فصل پنجم به بررسی نتایج بدست آمده و تحلیل و تفسیر و نتیجه گیری آنها می پردازد.

فصل ۲

معرفی روسازی بتن غلتکی

و

پیشینه علمی موضوع

بخش اول : معرفی روسازی بتن غلتکی

۱-۲ روسازی های بتنی (صلب)

در روسازی های صلب از بتن به عنوان لایه باربر اصلی استفاده می شود، در حالی که در روسازی های انعطاف پذیر از بتن آسفالتی برای سطح روبه و گاهی برای لایه های زیرین استفاده می شود. روسازی ها می توانند از نظر تئوری نیز تعریف شوند، در این تعریف از تحلیل دال جهت آنالیز و طراحی روسازی های صلب استفاده می شود، که معمولاً در این نوع از روسازی ها، خمش ناشی از بار وارده تعیین کننده است. در تحلیل روسازی های انعطاف پذیر از تحلیل سیستم های چند لایه ای استفاده می شود که در این نوع از روسازی ها تغییر شکل ناشی از بارهای وارده اهمیت خاصی دارد. گاهی اوقات در ساخت روسازی ها هم از بتن و هم از بخش آسفالتی استفاده می شود که به روسازی های مرکب معروف اند. از اهداف اصلی روسازی ها که هم در حین ساخت و هم در هنگام بهره برداری بایستی مورد توجه قرار گیرد، شامل صرفه ی اقتصادی حداکثر، حداکثر ایمنی کافی، قابلیت خدمت دهی حداکثر، حداکثر ظرفیت بارگذاری، حداقل خرابی ها در اثر ترافیک و شرایط محیطی، حداقل سر و صدا و آلودگی، حداقل اختلال کاربری و حداکثر زیبایی مطلوب می باشد [۴].

۲-۱-۱ انواع روسازی های صلب :

پنج نوع روسازی صلب وجود دارد. این تقسیم بندی بر اساس انواع آرماتوربندی آن ها و فولادهای انتقال بار بین دال های بتنی در محل درزها می باشد [۵]:

-روسازی های بتنی مسلح درزدار JRCP

-روسازی های بتنی مسلح پیوسته CRCP

-روسازی بتنی پیش تنیده PCP

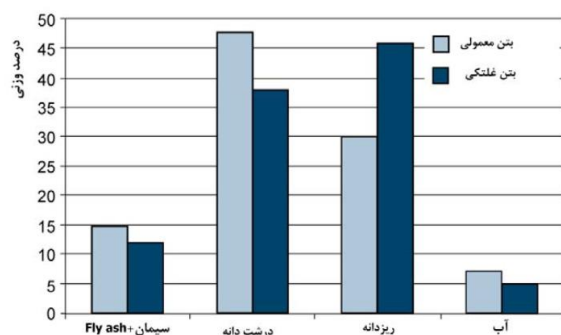
-روسازی بتنی پیش ساخته

-روسازی های بتنی غیر مسلح درزدار JPCP

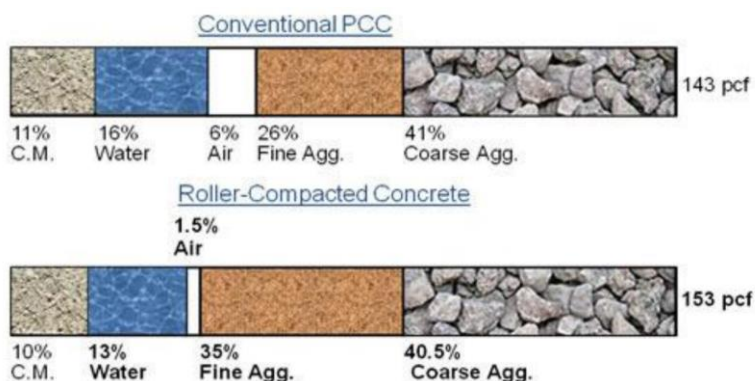
۲-۲ روسازی بتن غلتکی :

روسازی بتن غلتکی را می توان در دسته ی روسازی های غیر مسلح درزدار قرار داد که البته تفاوت های عمده ای در نحوه ساخت، فواصل و عملکرد درزها، بافت سطحی روسازی و ... با دیگر روسازی های غیرمسلح درزدار

دارد. استفاده از بتن غلتکی در کارهای روسازی، فناوری نسبتاً جدیدی است که در آن از ماشین آلات و تجهیزات مربوط به جاده های معمولی استفاده می شود و شامل لایه ریزی و متراکم کردن بتن بدون اسلامپ با طرح اختلاط توصیه شده توسط ACI در محل می باشد [۶]. روسازی بتن غلتکی عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشک که از سنگ دانه ها (با اندازه حداکثر ۱۹ میلیمتر)، مواد سیمانی و آب تشکیل شده است. وجه تمایز روسازی بتن غلتکی نسبت به روسازی بتن معمولی درصد ریزدانه بیشتر آن نسبت به درشت دانه است. در شکل های ۱-۲ و ۲-۲ مقایسه ای بین مصالح تشکیل دهنده بتن غلتکی و بتن معمولی صورت گرفته است. مخلوط تولید شده توسط دامپ تراک ها یا نقاله ها در محل قرار گرفته و توسط فینیشر یا پیورهای اصلاح کننده آسفالت روی لایه زیرین پخش شده و سپس توسط غلتک های ویبره ای کوبیده و متراکم می گردد و سرانجام بعد از سخت شدن در اثر واکنش هیدراتاسیون سیمان به بتن تبدیل می گردد [۵].



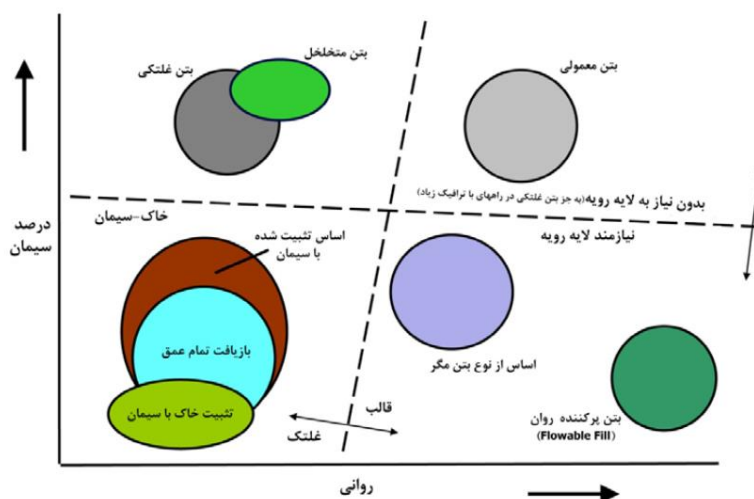
شکل ۱-۲: مقایسه درصد مصالح تشکیل دهنده بتن غلتکی و بتن معمولی [۷]



شکل ۲-۲: مقایسه درصد مصالح ریز و درشت در بتن معمولی و بتن غلتکی [۷]

مواد تشکیل دهنده بتن غلتکی در داخل مخلوط کن به یک مخلوط همگن تبدیل و دارای ظاهری مشابه با مخلوط شن نمدا و یا بتن با اسلامپ صفر دارند. هنگامی که RCC به عنوان یک لایه سطحی استفاده می شود، حداقل

مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال به طور کلی مشخص می شود. مصالح RCC ترکیب شده و یک توده ناهمگن ایجاد شده که (استحکامی) شبیه به ماسه مرطوب یا بتنی با اسلامپ صفر می باشد. این مخلوط ها توسط تجهیزات ساخت روسازی آسفالتی در لایه هایی که ضخامت حداکثر آن ها در وضعیت متراکم شده از ۲۵ سانتیمتر تجاوز نمی کند پخش و سپس متراکم می شوند. لایه ها با غلتک های فولادی و بیره ای متراکم می گردند. در مواردی برای رسیدن به کیفیت بهتر سطح از غلتکهای چرخ لاستیکی برای تراکم نهایی لایه ها استفاده می شود. پس از انجام عملیات تراکم، عملیات عمل آوری و مرطوب نگهداشتن سطح بتن آغاز می گردد تا امکان دستیابی به روسازی با سطح سخت و با دوام فراهم آید. معمولاً از روسازی بتن غلتکی به عنوان سطح نهایی روسازی استفاده می شود. بتن غلتکی ظاهری خشک دارد و تا قبل از متراکم شدن خمیرسیمان در آن چندان قابل مشاهده نیست. امروزه جهت احداث بزرگراه ها و راه های درجه یک با کارایی و کیفیت مطلوب ترکیبی از لایه ای به ضخامت ۲۵ سانتی متر بتن و سپس یک لایه نازک آسفالت مورد استفاده قرار می گیرد. اما در خیابان ها و راه های کم ترافیک می توان بطور مستقیم از این روسازی بدون نیاز به لایه آسفالت استفاده کرد. زمان بین پایان مخلوط کردن و اتمام تراکم غلتکی نباید بیش از ۴۵ دقیقه زمانی که درجه حرارت هوا کمتر از ۸۵ درجه فارنهایت است و نباید بیش از ۳۰ دقیقه زمانی که درجه حرارت هوا برابر یا بیشتر از ۸۵ درجه فارنهایت طول بکشد [۵]. شکل ۲-۳ نیز مقایسه انواع بتن مخلوط سیمان با مصالح سنگی را از نظر روانی، درصد سیمان، نیاز به قالب، نیاز به غلتک و نیاز به رویه نشان می دهد. مقاومت و دوام مناسب روسازی های بتن غلتکی به همراه سرعت ساخت و هزینه آن، باعث شده است که استفاده از این نوع روسازی گزینه مناسبی برای روسازی محوطه های روباز کارخانجات صنعتی، جاده های دسترسی معادن، محوطه های بنادر و ... باشد.



شکل ۲-۳ : مقایسه انواع بتن(مخلوط سیمان با مصالح سنگی) از نظر روانی، درصد سیمان، نیاز به قالب، نیاز به غلتک و نیاز به لایه رویه [۷]

صرفه جویی در هزینه تا بیش از ۶۰٪ با استفاده از روکش های RCC در مقایسه با روکش های بتنی معمولی می تواند به دست آید. ترکیبات اصلی RCC با بتن معمولی مشابه است اگرچه نسبت این مواد متفاوت است. RCC در مقایسه با بتن معمولی نیاز به نسبت بیشتری از ریزدانه، آب کمتر و میزان سیمان کمتر دارد [۸].

۲-۳ مقایسه روسازی های بتن غلتکی و بتن معمولی

در جدول ۲-۱ طرح اختلاط بتن غلتکی و بتن معمولی با یکدیگر مقایسه شده و همانطور که ملاحظه می شود، میزان سیمان و آب در بتن معمولی از بتن غلتکی بیشتر می باشد. اما بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی دارای ماسه بیشتری می باشد [۹]. در جدول ۲-۲ طرح اختلاط مربوط به چند روسازی ساخته شده با بتن غلتکی آمده است. همان طور که ملاحظه می شود میزان سیمان در این طرح اختلاط حدود ۱۹-۱۲ درصد سنگدانه ها می باشد. این میزان سیمان به مراتب کمتر از سیمان مربوط به روسازی های بتنی معمولی است.

جدول ۲-۱ : مقایسه طرح اختلاط روسازی های ساخته شده با بتن غلتکی و بتن معمولی [۹]

وزن مصالح (کیلوگرم بر متر مکعب)								بزرگترین اندازه سنگدانه (میلی متر)	نوع روسازی
درصد وزن آب به مصالح خشک	درصد وزن سیمان به سنگ دانه ها	ریزدانه	درشت دانه	سیمان	آب	وزنی ریزدانه به کل سنگدانه ها	درصد		
۶/۱	۱۹/۸	۰/۸۱	۶۰۰	۱۳۴۲	۳۲۵	۱۳۸	۳۱	۳۸	بتن معمولی
۴/۳	۱۱/۸	۰/۶۴	۹۳۶	۱۲۴۲	۲۵۶	۱۰۴	۴۳	۱۹	بتن غلتکی

جدول ۲-۲ : طرح اختلاط مربوط به چند روسازی بتن غلتکی [۹]

مصالح مصرفی (کیلو گرم بر متر مکعب)										پروژه	
درصد وزن آب به کل مصالح خشک	درصد وزن مصالح چسبنده به کل سنگدانه ها	ریزدانه	درشت دانه		نسبت آب به مصالح چسبنده	آب	مصالح چسبنده				
			وزن	نسبت ریزدانه به درشت دانه (وزنی)			خاکستر بادی		وزن		نوع ^۱
							وزن	نسبت			
۴/۸۷	۱۶	۹۵۶	۹۵۶	۱۹	۰/۳۵	۱۰۸	۱۵۴	C	۱۵۴	آستین	
۵/۳۰	۱۹	۸۷۰	۱۰۶۰	۱۹	۰/۳۴	۱۲۲	۱۲۶	F	۲۳۸	پادگان کمپبل	
۵/۳۷	۱۸	۵۸۷	۱۳۷۸	۱۹	۰/۳۵	۱۲۵	۸۹	F	۲۶۷	پادگان درام	
۴/۸۱	۱۶	۹۲۰	۱۱۲۲	۱۹	۰/۳۵	۱۱۴	۸۹	F	۲۳۸	اسپرینگ هیل	

۱- با توجه به ترکیبات شیمیایی و نوع ذغال سنگ تشکیل دهنده ی خاکستر بادی، ASTM C618 [۳۶] آن را به دو کلاس F و C تقسیم می کند.

۲-۴ معایب و مشکلات استفاده از روسازی بتن غلتکی

۱- از معایب بارز این نوع روسازی میتوان به مشخصه سطحی آن اشاره کرد که به علت تراکم با غلتک دارای سطحی صاف می باشند، به همین خاطر برای تامین مقاومت لغزشی کافی در سرعت های بالا نیاز به لایه ای از آسفالت به ضخامت ۵۰ میلیمتر روی لایه RCC است. همچنین در بهبود همواری و مقاومت لغزشی یا برای اصلاح ناهمواری اولیه که به دلیل مشکلات ساخت ایجاد می شود، می توان اقدام به تراش زدن رویه نمود که این تکنیک به عنوان روشی برای کاهش سر و صدای ایجاد شده توسط لاستیک روی سطح روسازی می باشد.

۲- ایجاد ترک های سطحی و عمقی در بتن به علت خاصیت بتن و تبخیر سطحی و جمع شدگی در سطح و عمق.

۳- پوسته ای و ورقه ای شدن سطح در اثر جدا شدن سنگدانه ها.

۴- وجود درزهای انبساط بعنوان یکی از نقاط ضعف رویه های بتنی محسوب می گردد، که در تشدید خرابی ها و تخریب بتن نقش مهمی دارد به نحوی که مشکل نگهداری و مرمت محل درزهای انبساط به لحاظ پکیدن بتن وجود دارد.

۵- بروز پدیده پامپینگ و خارج شدن مصالح ریزدانه از محل درزهای انبساط در صورت عدم استفاده از مصالح زهکش بعنوان یکی از ضعف های روسازی بتنی محسوب می گردد.

۶- بدست آوردن بافت سطحی مناسب برای جلوگیری از لغزش.

۷- دانش فنی و تجربه ساخت روسازهای آسفالتی در میان پیمانکاران در مقایسه با روسازی های بتنی بسیار بیشتر است، از این رو اجرای رویه های بتنی بدلیل نیاز به ماشین آلات پیشرفته و جدیدتر و عدم مهارت های فنی و تجربه های عملی مشکل تر است.

۲-۵ راهکارهای جبران ضعف روسازی بتنی :

۱- مطالعه تحقیقاتی انجام شده توسط کالتران^۴ به کیفیت بهتر طول عمر مورد انتظار توسط تراش زدن در روسازی های بتنی از جمله RCC اشاره می کند. مطالعات انجام شده در سرتاسر کشور آمریکا متوسط طول عمر یک پروژه تحت تراش زدن را حدود ۱۴ سال با قابلیت اطمینان ۵۰ درصد یا حدود ۱۱ سال با قابلیت اطمینان ۸۰ درصد نشان می دهد.

^۴ Caltrans-2005

۲- در جاده های با حجم ترافیک بالا و یا سرعت بالای ترافیک و همچنین در باند فرودگاه ها مساله مقاومت کافی سطح در برابر لغزندگی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در روسازی های بتنی معمولی جهت بهبود مقاومت در برابر لغزش برای کاربردهای فوق الذکر لازم است بافت زبری روی سطح بتن ایجاد گردد، که به این کار ایجاد بافت می گویند. ایجاد بافت عموماً روی روسازی های بتن معمولی در حالت تازه و از طریق کشیدن جارو یا گونی خیس یا برس های خاص روی سطح بتن انجام می گیرد. در صورتی که سطح روسازی بتن سخت شده دارای بافت نبوده و یا بافت ایجاد شده فرسوده گردد، می توان با کاربرد تیغه های گردنده شیار زن بافت زبر مورد نظر را روی سطح روسازی بتنی ایجاد نمود.

۳- عواملی که می توانند باعث تشدید ناصافی سطح شوند عبارتند از ضخامت زیاد لایه بتن غلتکی، عدم تراکم کافی توسط دستگاه فینیش و ماندن بخش قابل توجهی از تراکم برای غلتک ویریه ای و ضعیف بودن زیرسازی، لذا کنترل عوامل فوق در بهبود صافی سطح موثر خواهد بود.

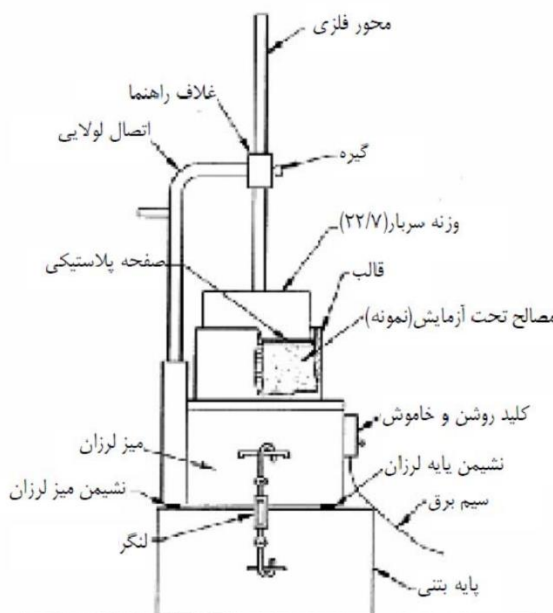
۴- بتن غلتکی از یک طرف به اندازه کافی خشک می باشد تا بتواند وزن غلتک متراکم کننده را تحمل کند. از طرف دیگر این نوع بتن به اندازه کافی مرطوب و دارای آب است تا توزیع مناسبی از خمیر سیمان در داخل مخلوط بتن سیمانی ایجاد شود. در سال ۱۸۶۸، هنری این نظریه را بیان کرد که در طرح اختلاط بتن باید از کمترین مقدار آب استفاده شود تا بهترین نتیجه حاصل شود و از آن زمان، تئوری استفاده شده از کمترین آب به وجود آمد. در دهه های آخر قرن بیستم تولید بتن های خشک بدون تراکم و کوبیدن زیاد منجر به کاهش کیفیت و کاهش مقاومت بتن تولید شده شد ولی با بکارگیری و ظهور دستگاه های ویریه، بتن های با اسلامپ صفر به عنوان مصالح سازه ای واقعی بکار برده شده اند، لذا کاربرد بتن با اسلامپ صفر گسترش یافت و هم اکنون بتن با اسلامپ صفر دو کاربرد اساسی و وسیع دارد، یعنی: بتن غلتکی و بتن پیش ساخته. اصطکاک بین سنگدانه ها از طریق متراکم کردن با غلتک بدست می آید و ایجاد چسبندگی بین سنگدانه ها از طریق خمیر سیمانی مورد استفاده در ساخت بتن تامین می شود که در نهایت منجر به بدست آمدن ظرفیت باربری کامل بتن غلتکی می شود.

۲-۶ برخی ویژگی های روسازی بتن غلتکی در حالت تازه:

از جمله ویژگی های بتن غلتکی در حالت تازه می توان به کارآیی، آب انداختگی، وزن مخصوص و درجه تراکم و ... اشاره کرد. در ادامه به بررسی این خصوصیات و تأثیرات آنها بر دیگر ویژگی های روسازی های بتن غلتکی پرداخته شده است.

۲-۶-۱ کارایی:

کارایی پارامتری کلیدی برای تعیین سازگاری بتن غلتکی است. بتن غلتکی، بتنی است بسیار سفت و خشک که میزان آب آن بسیار کمتر از بتن های معمولی است. لذا روش های معمول تعیین روانی و کارایی نظیر آزمایش اسلامپ برای این نوع بتن قابل کاربرد نیست. روشی که برای اندازه گیری کارایی بتن غلتکی توسعه یافته است روش تعیین روانی با آزمایش وی بی اصلاح شده است. در این آزمایش از دستگاه وی بی استاندارد همراه با یک سربرار استفاده می شود. میزان این سربرار بسته به مراجع مختلف متغیر بوده و از $13/3$ تا $22/71$ کیلوگرم در نظر گرفته می شود. برای بتن های غلتکی روسازی، زمان وی بی اصلاح شده تحت سربرار بین 30 تا 45 ثانیه توصیه شده است [۱۰]. نحوه انجام آزمایش به این شکل است که بتن غلتکی داخل ظرف استوانه های فلزی که روی میز قابل ارتعاش قرار دارد ریخته می شود و وزنه استوانه های فلزی که قطر آن کوچکتر از قطر ظرف بوده و امکان رویت بخش محیطی بتن غلتکی را فراهم می آورد روی آن قرار داده می شود سپس میز مرتعش کننده روشن شده و زمان لازم از شروع ارتعاش تحت سربرار تا رویت خمیر سیمان بیرون آمده از بتن غلتکی در محیط وزنه استوانه های اندازه گیری می شود که این به منزله دستیابی به تراکم مناسب است. روش استاندارد انجام آزمایش زمان وی بی یا اصلاح شده در استاندارد ASTM C1170 تشریح شده است. مسئله کاهش کارایی بتن غلتکی پس از ساخت مخلوط در طی زمان و شروع گیرش بتن از مسائل مهم در بتن غلتکی است. در شکل ۲-۴ تجهیزات اندازه گیری زمان وی بی اصلاح شده به صورت شماتیک ارائه شده است [۵].



شکل ۲-۴ : دستگاه اندازه گیری کارایی بتن غلتکی به روش وی بی اصلاح شده [۵]

۲-۶-۲ آب انداختگی

مسئله امکان آب انداختگی در بتن های معمولی و روسازی های بتن معمولی از مواردی است که باید مدنظر قرار گرفته و کنترل شود؛ اما در بتن های غلتکی به علت کم بودن آب اختلاط پدیده آب انداختگی رخ نمی دهد. در نتیجه مشکلات ناشی از ایجاد لایه ضعیف روی سطح بتن به دلیل آب انداختگی در این نوع بتن ها مسئله ساز نبوده و می تواند از مزایای این نوع بتن ها در نظر گرفته شود [۸].

۲-۶-۳ وزن مخصوص و درجه تراکم

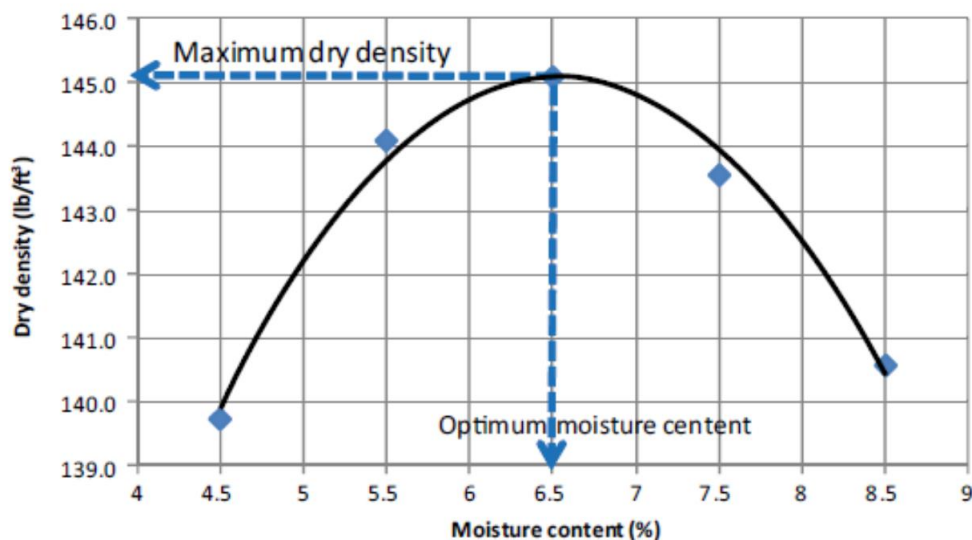
هرچند در حالت تازه بتن غلتکی ظاهری شبیه خاک نم دار دارد؛ اما در حالت سخت شده مشابه بتن های معمولی بوده و با توجه به مقدار کمتر آب در این نوع مخلوط ها در صورت تراکم مناسب جرم حجمی آنها قدری بیشتر از بتن های معمولی می شود. جرم حجمی حدود ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بتن های غلتکی روسازی مقادیری متعارف است. با توجه به خشکی مخلوط های بتن غلتکی، میزان تراکم تأثیر بسیار مهمی بر جرم حجمی آن ها دارد. براین اساس رفتار بتن غلتکی در حالت تازه تحت انرژی تراکم مشابه رفتار خاک می تواند فرض شود و مبانی ژئوتکنیکی وزن مخصوص حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای بتن های غلتکی قابل اعمال خواهد بود. در شکل ۲-۵ رابطه کلی وزن مخصوص- درصد رطوبت برای مخلوط بتن غلتکی ارائه شده است و همانطور که مشخص است در درصد رطوبت کمتر از مقدار بهینه، امکان تراکم کامل نمونه با انرژی تراکم مشخص میسر نیست و افت در جرم حجمی مشاهده می گردد. با افزایش درصد رطوبت و تا رسیدن به درصد رطوبت بهینه وزن مخصوص بتن غلتکی افزایش می یابد [۱۱]. پس از مشخص شدن درصد رطوبت بهینه مخلوط و طرح اختلاط می توان از وزن مخصوص خشک بتن غلتکی به عنوان پارامتری برای کنترل کیفیت بتن غلتکی اجرا شده در کارگاه استفاده کرد. از این رو از پارامتر درجه تراکم R_d به عنوان شاخص مناسب بودن بتن اجرا شده می توان استفاده نمود. درجه تراکم از رابطه زیر بدست می آید :

$$R_d = \frac{\delta df}{\delta dm f} \times 100 \quad \text{رابطه ۲-۱}$$

R_d : درجه تراکم بر حسب درصد

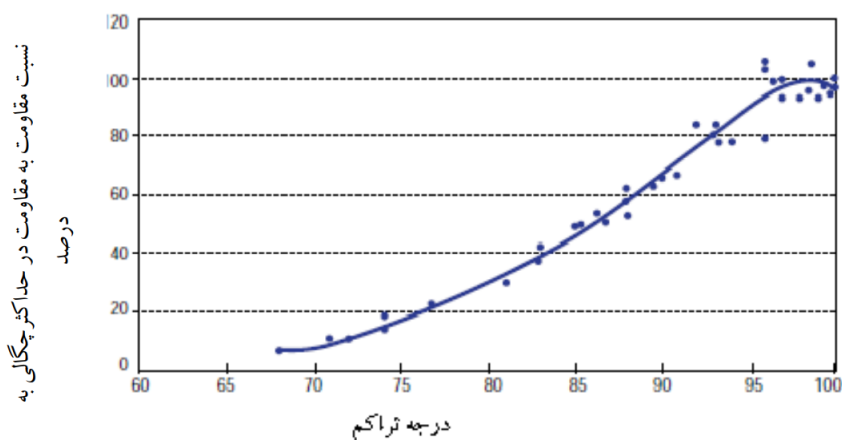
δdf : جرم حجمی خشک بتن غلتکی متراکم شده در حالت تازه در کارگاه

$\delta dm f$: جرم حجمی خشک بتن غلتکی متراکم شده با انرژی تراکم پراکتور اصلاح شده در حالت تازه [۵]

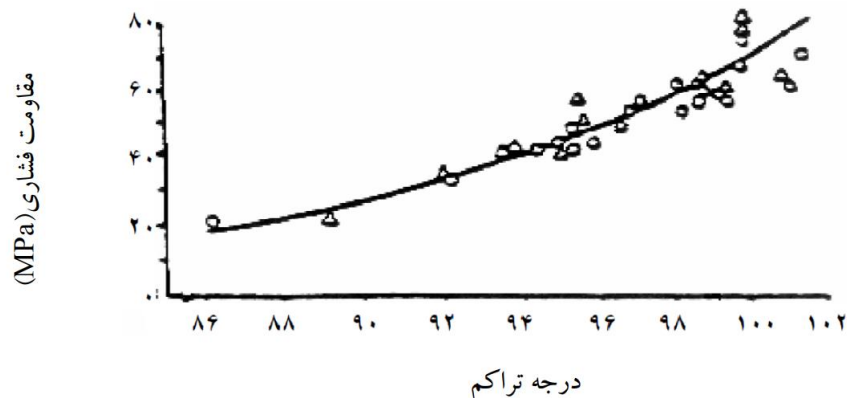


شکل ۲-۵: رابطه وزن مخصوص - درصد رطوبت برای بتن غلتکی

درجه تراکم عاملی موثر در خواص بتن های غلتکی است و در صورت عدم دستیابی به تراکم مناسب پارامترهای مقاومتی و دوام بتن غلتکی تنزل خواهد نمود. در شکل ۲-۶ تأثیر درجه تراکم بر روی مقاومت برای چند طرح اختلاط بتن غلتکی نشان داده شده است [۱۱]. در شکل ۲-۷ نیز تأثیر درجه تراکم بر روی مقاومت فشاری برای یک مخلوط تهیه شده در محدوده رطوبت بهینه آن ارائه شده است [۸].



شکل ۲-۶: تأثیر درجه تراکم بر روی مقاومت چند طرح اختلاط بتن غلتکی [۱۱]



شکل ۲-۷: تاثیر درجه تراکم بر روی مقاومت فشاری بتن غلتکی [۸]

به علت پایین بودن نسبت آب به سیمان و خشک بودن بتن، مقدار زیادی هوا در مخلوط بتن غلتکی بعد از ساخت وجود دارد. بصورت تجربی مشخص شده است که اختلاف ضخامت قبل و بعد از غلتک زنی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد می باشد، یعنی جهت بدست آوردن ضخامت ۱۰۰ میلی متر، باید حدود ۱۳۰ تا ۱۴۰ میلی متر بتن پخش شده و عملیات غلتک زنی و تراکم صورت گیرد [۱۲].

۲-۶-۴ خواص مکانیکی:

خواص مکانیکی روسازی های بتن غلتکی همانند روسازی های بتنی معمولی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کشش ترک خوردگی، مدول الاستیسیته، مقاومت خستگی، مقاوت چسبندگی و دوام می باشد. مهمترین عوامل تأثیرگذار روی خصوصیات مکانیکی روسازی های بتن غلتکی، درجه تراکم آن، میزان مصالح چسبنده و کیفیت سنگدانه های موجود در آن می باشند. با وجود گذشت چندین سال از کاربرد بتن غلتکی، هنوز تحقیقات انجام شده به منظور بررسی خواص مکانیکی این نوع بتن کافی نمی باشد. این در حالی است که تا به امروز روش استاندارد جهت ساخت نمونه های بتن غلتکی در آزمایشگاه وجود ندارد و باید نمونه های بتن غلتکی با توجه به روش به کار گرفته شده در ساخت آن ها مقایسه گردند. به طور معمول اطلاعات بدست آمده در زمینه ی خواص مکانیکی بتن غلتکی، براساس نتایج بدست آمده از تست نمونه های مغزه گرفته شده از روسازی یا تست مقاطع ساخته شده در مقیاس کامل که در آزمایشگاه انجام گرفته است، می باشد [۱۳].

۲-۶-۴-۱ مقاومت فشاری:

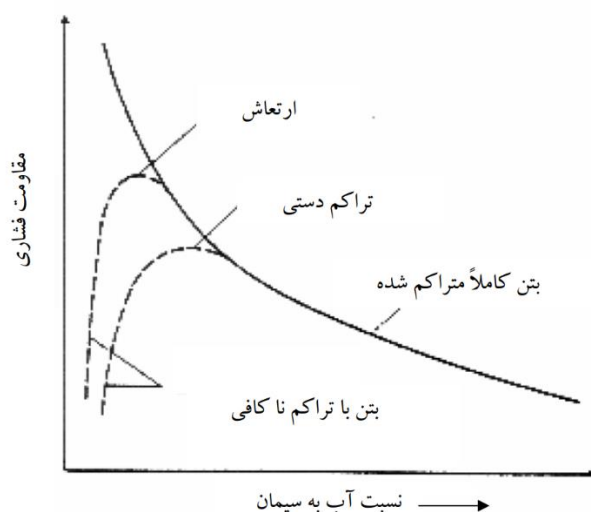
مقاومت بتن غلتکی به مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان (W/C) کیفیت مصالح دانه ای و درجه تراکم بتن بستگی دارد. به طور کلی، مقادیر مقاومت فشاری در مقایسه با بتن معمولی می توانند بسیار بیشتر باشند و مقدار آن معمولاً بین ۲۸ تا ۴۱ مگاپاسکال در ۲۸ روز است. عملکرد بتن در مقابل تنش های وارده نه فقط به نوع تنش

بلکه همچنین به چگونگی ترکیب عوامل مختلف موثر بر تخریل اجزای مختلف بتن بستگی دارد. عوامل فوق شامل خواص و نسبت های مصالح تشکیل دهنده بتن، درجه تراکم آن و شرایط عمل آوری بتن می باشد.[۵]

طبق نظر ACI مهم ترین و ارزشمندترین ویژگی بتن مقاومت آن است. از انواع مقاومت بتن، عمدتاً مقاومت فشاری و مقاومت خمشی آن بیشتر مورد توجه است. این مقاومت در بتن های معمولی به مقاومت ملات سیمان و چسبندگی بین ملات و سنگدانه ها بستگی دارد، مقاومت سنگدانه ها بر مقاومت بتن معمولی موثر است ولی عموماً مقاومت سنگدانه ها بیشتر از مقاومت ملات سیمان می باشد، در نتیجه در این نوع بتن ها چسبندگی بین ملات و سنگدانه ها سقف مقاومت بتن ساخته شده و خصوصاً مقاومت خمشی را تعیین خواهد کرد. مقاومت فشاری مورد نظر برای بتن غلتکی جهت ساخت روسازی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقاومت های در نظر گرفته شده برای بتن های غلتکی مورد استفاده در سد سازی است. در بتن های غلتکی سد سازی با توجه به اهمیت ویژه مسائل حرارتی سعی بر این است که مقدار سیمان به حداقل لازم محدود گردد. همچنین با توجه به عدم نیاز به مقاومت بالا در بتن های حجیم سد سازی، نسبت آب به سیمان در این بتن ها عمدتاً بالا بوده و اغلب بین ۰/۵ تا ۱ تعیین می گردد[۱۴]. در زمینه روسازی راه خصوصاً وقتی از بتن غلتکی به عنوان سطح نهایی تردد استفاده می شود، تهیه بتن غلتکی با دوام و مقاومت فشاری بالا مد نظر قرار می گیرد و این در حالی است که با توجه به ضخامت کم روسازی بتن غلتکی و امکان اتلاف نسبتاً آسان حرارت تولید شده در بتن های غلتکی روسازی راه، مسئله حرارت زایی و پایین نگهداشتن مقدار سیمان چندان حائز اهمیت نیست. لذا مقدار مواد سیمانی در این نوع بتن های غلتکی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقادیر معمول در بتن های غلتکی پروژه های سد سازی می باشد [۵]. در آمریکا مقدار حداقل مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی عمدتاً در مشخصات فنی بیش از ۲۷،۶ مگاپاسکال قید می گردد[۱].

در یک تحقیق انجام شده در داخل کشور، مقاومت متوسط ۴۵ مگاپاسکال از نمونه های استوانه ای با ابعاد 30×15 سانتی متر، تحت شرایط عمل آوری مرطوب حاصل گردید. نسبت آب به سیمان این مخلوط ۰/۴ (درصد وزنی سیمان به وزن کل بتن غلتکی ۱۴/۶ درصد) بوده است. نتیجه فوق نشانگر امکان تولید بتن غلتکی با مصالح داخل کشور منطبق با الزامات فنی کشورهای مختلف برای بتن غلتکی با مصالح روسازی راه است. همچنین تحقیق فوق الذکر نشانگر تأثیر بسیار قابل توجه شرایط عمل آوری روی طراحی بتن غلتکی است. در صورت عدم اعمال عمل آوری مرطوب و نگهداری نمونه بتن غلتکی در شرایط محیطی آزمایشگاه با رطوبت نسبی ۴۰ درصد میزان افت مقاومت فشاری حدود ۵۰ درصد مشاهده شده است. قابل توجه است که اعمال عمل آوری با پوشش های غشایی به تنهایی تأثیر نسبتاً کمی در بهبود وضعیت داشته و نسبت به حالت عمل آوری مرطوب، افت حدود ۳۵ درصد در مقاومت فشاری دیده شده است. در خصوص پارامترهای تأثیر گذار روی مقاومت بتن غلتکی، درجه تراکم دارای اهمیت زیادی است و لذا درصد رطوبت مخلوط از دیدگاه ژئوتکنیکی باید نزدیک به درصد رطوبت بهینه آن باشد

تا منجر به تراکم حداکثر و نتیجه مقاومت مناسب گردد [۱۵]. بر اساس گزارش های موجود از چند پروژه اجرا شده در کانادا و آمریکا، مقاومت فشاری نمونه های مغزه گیری شده نشان می دهد که مقاومت فشاری بتن غلتکی در مقایسه با مقاومت فشاری بتن معمولی بالاتر است. مقاومت فشاری بتن غلتکی به عوامل مختلفی از جمله نسبت آب به سیمان، درجه تراکم، میزان مصالح چسبنده و دانه بندی و جنس مصالح سنگدانه ای بستگی دارد [۵]. نکته ای که در خصوص بتن غلتکی باید در نظر داشت این است که در این نوع از مصالح برخلاف خاک ها ماده ای با قابلیت واکنش هیدراتاسیون و کسب مقاومت در طی زمان، یعنی سیمان نیز موجود است. لذا مقاومت بتن های غلتکی همانند بتن های معمولی به پارامتر نسبت آب به سیمان w/c نیز بستگی دارد. با کاهش w/c مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد. البته موضوع اخیر با فرض کافی بودن درصد رطوبت جهت تراکم مطلوب بتن غلتکی است. اندرکنش دو پارامتر اخیر در شکل ۸-۲ ارائه شده است. از اینرو حداکثر مقاومت یک مخلوط بتن غلتکی عمدتاً در مقدار آب متناظر با درصد رطوبت بهینه آن حاصل می گردد [۵].



شکل ۸-۲ : رابطه مقاومت فشاری مخلوط با نسبت آب به سیمان و درصد رطوبت [۵]

در جدول ۳-۲ مقاومت فشاری نمونه های مغزه گیری شده از پروژه های اجرا شده در کانادا نشان داده شده است [۱۶]. در جدول ۴-۲ نیز مقاومت نمونه ای مغزه گرفته شده از چند پروژه اجرا شده در آمریکا نشان داده شده است. در مقایسه با بتن معمولی، برای میزان سیمان یکسان، مقاومت فشاری بتن غلتکی بیشتر می باشد [۱۳].

جدول ۲-۳: مقاومت فشاری نمونه های مغزه گرفته شده از پروژه های اجرا شده در کانادا [۱۶]

پروژه	سن مغزه های گرفته شده (سال)	درصد سیمان مصرفی	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
انبار درختان قطع شده کایسیوس	۸	۱۳	۴۱۳
بندر بارگیری لیتترم	۳	۸	۳۳۰
انبار درختان قطع شده در فراسر میلز	۱	۱۳	۳۳۰
معدن زغال سنگ بالموس	۱	۱۴ ^۱	۱۵۵
اسکله شهر فراسر	۱	۱۲	۳۲۱

۱- ۵۰ درصد میزان سیمان فوق شامل پوزولان طبیعی می باشد.

جدول ۲-۴: مقاومت فشاری نمونه های مغزه گرفته شده از پروژه های اجرا شده در آمریکا [۱۳]

پروژه	سن نمونه (ماه)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	ضخامت روسازی (میلی متر)	مقاومت فشاری نمونه های مغزه گرفته شده (مگاپاسکال)		
				نیمه بالایی نمونه	نیمه پایینی نمونه	نمونه کامل
A	۹	۳۱	۱۷۸	۵۶	۴۳/۸	۴۹/۶
B	۱۹	۳۴/۵	۱۶۵	---	---	۳۲/۷
C	۱۹	۳۴/۵	۲۱۶	۲۹/۹	۱۶/۸	۳۱/۴
D	۱۸	۲۵/۳	۲۱۶	---	---	۴۸/۵
E	۱۲	۱۳/۸	۲۵۴	۱۵/۸	۳۱/۹	---
F	۲۸	۳۰/۱	۱۷۸	۳۲/۲۷	۲۹/۲	---
G	۳۲	۳۴/۵	۲۱۶	۴۷/۵	۳۳/۹	---

۲-۴-۶-۲ مقاومت خمشی

مقاومت خمشی (ضریب گسیختگی) بتن غلتکی، بسته به طرح مخلوط، معمولاً بین ۳/۵ تا ۷ مگاپاسکال است. هرچند مقاومت خمشی بتن غلتکی به عنوان پارامتر مهمی در طراحی روسازی در نظر گرفته میشود ولی تهیه نمونه های خمشی در آزمایشگاه یا بریدن نمونه های منشوری لازم از بتن درجا اجرا شده جهت تعیین این پارامتر دشوار است. شایان توجه است که همانند مقاومت فشاری پارامترهایی نظیر w/c و درجه تراکم روی مقاومت

خمشی بتن های غلتکی تأثیر قابل توجهی دارند و در صورتی که به علت مناسب نبودن درصد رطوبت و یا انرژی تراکم مناسب صورت نگیرد افت مقاومت خمشی ایجاد خواهد شد [۵]. با توجه به تیرها و مغزه های بدست آمده از مقاطع مختلف، ملاحظه میشود که رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری در بتن غلتکی مشابه رابطه ی بین مدول گسیختگی و مقاومت فشاری در بتن معمولی می باشد [۱۷]؛

$$f_r = c\sqrt{f'_c}$$

رابطه ۲-۲ :

f_r : مدول گسیختگی (بارگذاری سه نقطه ای مگاپاسکال)

f'_c : مقاومت فشاری مگاپاسکال

c : ثابتی مربوط به طرح اختلاط بتن غلتکی است. اگر f'_c براساس کیلوگرم بر سانتیمتر مربع وارد شود این ثابت بین ۲/۳۸ تا ۲/۹۱ می باشد [۱۷].

با توجه به رابطه مستقیم بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن غلتکی، عوامل ذکر شده موثر در مقاومت فشاری بتن غلتکی، در مقاومت خمشی بتن نیز تاثیرگذار می باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه های تیر مغزه گیری شده از چند پروژه که با استفاده از بتن غلتکی ساخته شده اند در جدول ۲-۵ نشان داده شده است [۱۱]. این اطلاعات براساس تعداد محدودی نمونه تیر می باشد.

جدول ۲-۵ : مقاومت خمشی و کشش ترک خوردگی بدست آمده از پروژه های ساخته شده در آمریکا [۱۱]

نتایج مقاومت نمونه های مغزه گیری و تیرهای بریده شده (مگاپاسکال)		سن آزمایش (روز)	پروژه
میانگین مقاومت کششی	میانگین مقاومت خمشی		
---	۶/۹۷	۹۰	پادگان استوارت
---	۴/۵۶	۷	پادگان هود
---	---	۲۸	
۲/۳۳	---	۷	پادگان هاروی
۲/۷۶	۵/۴۰	۲۸	
۲/۶۲	۴/۴۶	۷	پادگان کمپل
---	---	۲۸	
۲/۶۲	۳/۸۳	۷	پادگان آبردین
۳/۱۲	۴/۱۴	۲۸	

۲-۶-۴ مقاومت کششی ترک خوردگی

مقاومت کششی بتن از دیگر خصوصیات مکانیکی آن می باشد. همانطور که میدانیم اگر چه معمولاً بتن به نحوی طراحی نمی شود که تنش کششی مستقیم را تحمل کند، لیکن مقدار مقاومت کششی در تخمین باری که تحت آن ترک ها توسعه می یابند، مهم است. وقتی که کشش قطری ناشی از تنش های برشی توسعه می یابند، مسائل ایجاد ترک بوجود می آید. اما متداول ترین حالت ترک خوردگی، ناشی از مهار جمع شدگی و شیب های دما است. مقاومت در کشش همچنین در سازه های بتنی غیر مسلح مانند سد ها، تحت شرایط زلزله مورد توجه است. به طور معمول مقاومت کششی بتن حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است، بنابراین کلیه عوامل موثر بر مقاومت فشاری بر روی مقاومت کششی نیز تاثیر گذار بوده است. از آنجا که مقاومت بتن تا حد زیادی به میزان تراکم آن بستگی دارد، لازم است میزان روانی مخلوط به حدی باشد که امکان دستیابی به یک تراکم مناسب را فراهم سازد. با افزودن فوق روان کننده، پوزولان ها به مقدار مناسب در مخلوط بتن میتوان کارایی مورد نظر را تامین کرد. مقاومت کششی برزیلی با آزمایش بر روی نمونه های استوانه ای تهیه شده از مخلوط بتن غلتکی یا روی نمونه های مغزه گرفته شده از بتن غلتکی اجرا شده قابل تعیین است [۱۸].

۲-۶-۴ مدول الاستیسیته

اطلاعات کمی که در خصوص مدول الاستیسیته بتن های غلتکی در دست است، حکایت از آن دارد که مدول الاستیسیته بتن های غلتکی روسازی مشابه و یا قدری بالاتر از مدول الاستیسیته بتن های معمولی با مقدار سیمان مشابه است. همچنین مدول الاستیسیته بتن غلتکی روسازی RCCP رابطه ای با مقاومت فشاری دارد که نظیر همان رابطه های است که برای بتن های معمولی روسازی وجود دارد [۱۷].

$$E_C = 4770\sqrt{f_c} \quad \text{رابطه ۲-۳:}$$

E_C : ضریب الاستیسیته بتن برحسب مگاپاسکال

f_c : مقاومت فشاری نمونه استوانه ای برحسب مگاپاسکال [۱۷]

۲-۶-۵ جذب آب

جذب آب بتن از خواص مهم آن به ویژه از نقطه نظر امکان نفوذ مواد و املاح خورنده و یا اشباع شدن آن است. در مطالعه غفوری درصد جذب آب مخلوط های روسازی بتن غلتکی که بطور 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 اند. شایان ذکر است که مقادیر جذب آب بتن معمولی، معمولاً زیر ۵ درصد است که براین

اساس مقادیر فوق الذکر نشانگر جذب آب کم مخلوط های بتن غلتکی روسازی است [۱۹]. مطالعه دیگری که روی نمونه های مغزه تهیه شده از روسازی آزمایشی بتن غلتکی اجرا شده انجام گردید مقدار جذب آب حدود ۳/۵ درصد را گزارش نموده است. در این مخلوط مقدار مواد سیمانی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزن مصالح خشک در نظر گرفته شده بود که این نیز تأییدی بر نتایج آزمایش غفوری است [۲۰].

۲-۶-۶ دوام در برابر سولفات ها

بررسی آزمایشگاهی انجام شده توسط غفوری و ژنگ نشان می دهد که با کاربرد سیمان نوع V (ضد سولفات) روسازی بتن های غلتکی دوام مناسبی در برابر محیط های سولفاتی خواهند داشت. نتایج نشان می دهد که حتی مخلوط های با مقدار سیمان برابر ۹ درصد وزن مصالح خشک که در محلول سولفات ۵٪ از سن ۲۸ روزه تا ۶ ماه نگهداری شدند، در مقایسه با نمونه های شاهد نگهداری شده در آب تنها ۵ تا ۹ درصد افت مقاومت یافته اند. همچنین بررسی نشان می دهد که عملکرد بتن غلتکی در این خصوص با افزایش مقدار مواد سیمانی ۱۲ تا ۱۵ درصد بهبود می یابد [۱۹].

۲-۶-۷ دوام در برابر ذوب و یخ

به علت روش ساخت بتن غلتکی ایجاد هوازایی جهت مقاوم سازی آن در برابر شرایط ذوب و انجماد دشوار است و لذا در پروژه های اجرا شده هوازایی در عمده موارد انجام نگرفته است. البته مطالعات آزمایشگاهی نتایج امیدوار کننده ای را در خصوص امکان هوازایی بدست داده اند؛ لیکن مقدار مواد هوازا باید بسیار بیشتر از آنچه برای بتن های معمولی متداول است بیش از ۵ برابر به کار روند. شکل حباب های هوای ایجاد شده نیز کروی شکل نخواهد بود [۲۱]. مطالعات میدانی حاکی از عملکرد خوب روسازی های بتن غلتکی در شرایط ذوب و یخ متوسط است؛ لیکن در شرایط ذوب و انجماد شدید اطلاعات کافی در خصوص عملکرد میدانی روسازی های بتن غلتکی در دسترس نیست و آزمایش های تعیین دوام در برابر ذوب و انجماد انجام شده به روش آزمایشگاهی ASTM - C666 روی مغزه های گرفته شده از روسازی های بتن غلتکی نشانگر ضعیف بودن آن ها در برابر شرایط ذوب و انجماد است؛ هرچند عملکرد میدانی آن ها نسبتاً مناسب بوده است. با توجه به رفتار و نتایج بدست آمده از آزمایش های با مقیاس بزرگ پذیرفته است که RCCP بعنوان یک گزینه برای روسازی در هر شرایط آب و هوایی قابل قبول است [۱۷].

۲-۷ تعیین ضخامت

برای تعیین ضخامت روسازی های بتن غلتکی همانند روسازی های بتنی معمولی، دو عامل مقاومت خمشی مورد نیاز و زیان های خستگی ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه مدنظر قرار می گیرد. تنش های خمشی و پدیده ی

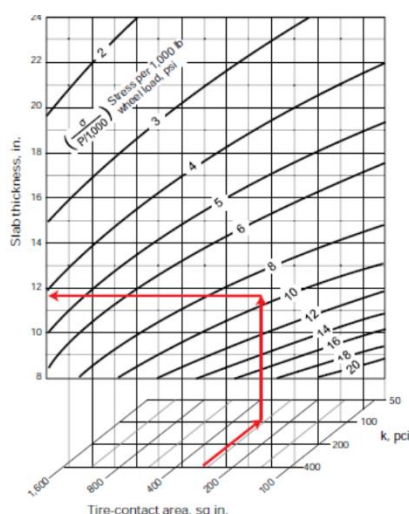
خستگی به محل عبور چرخ ها بستگی دارد؛ به صورتیکه در طول لبه ها و محل درزها بیشتر از بخش های داخلی لایه ی بتن ریزی شده می باشد. در حال حاضر دو روش مهم برای طراحی روسازی بتن غلتکی وجود دارد: یکی روش انجمن سیمان پرتلند PCA و دیگری روش مهندسين ارتش آمریکا. روش اول به طور کلی برای روسازی های صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش از هرگونه انتقال بار در محل ترک های طبیعی و یا درزهای اجرایی صرف نظر می شود. برای استفاده از روش انجمن سیمان پرتلند به اطلاعات اولیه زیر احتیاج است:

۱- مقاومت بستر یا زیر اساس و اساس

۲- مشخصات وسایل نقلیه مانند: بار چرخ ها، ویژگی تایر، تعداد تکرار بار در دوره عمر روسازی

۳- مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته RCC

در این روش برای تعیین ضخامت روسازی از نمودارهای موجود در شکل ۹-۲ استفاده می شود [۲]

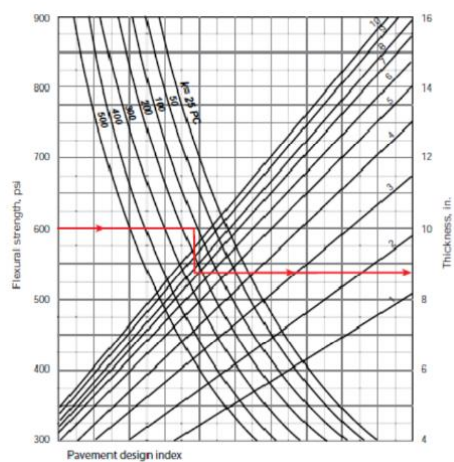


شکل ۹-۲ : نمودار طراحی ارائه شده توسط انجمن سیمان پرتلند برای بار ناشی از یک چرخ [۲]

روش ارائه شده توسط انجمن سیمان پرتلند، در اصل مربوط به روسازی های صنعتی می باشد. ولی می توان از آن در تعیین ضخامت انواع دیگر روسازی نیز استفاده کرد. در این روش ضخامت بر اساس شرایط بار داخلی تعیین می گردد و در آن از یک سری روابط خستگی مربوط به بتن غلتکی استفاده می شود [۶]. روش توصیه شده توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا، در حقیقت همان روشی است که این اداره در مورد تعیین ضخامت روسازی های بتنی معمولی استفاده می کنند. در این روش ابتدا باید گروه ترافیکی موردنظر مشخص شود و سپس با در نظر گرفتن اثرات تکرار بار از جدول ۶-۲ یک نشانه طراحی انتخاب شود. سپس ضخامت لایه از نمودار شکل ۱۰-۲ به داشتن نشانه طراحی و مقاومت خمشی RCC بدست می آید [۶].

جدول ۲-۶ : مقادیر شاخص طراحی ارائه شده توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا برای روسازی های سخت [۶]

نرخ ترافیک							شاخص طراحی ارائه شده روسازی های سخت برای جاده ها و خیابان ها
طبقه بندی							
F	E	D	C	B	A		
۱	۱	۱	۲	۲	۲	I	
۱	۲	۲	۲	۲	۳	II	
۲	۳	۳	۴	۴	۴	III	
۳	۴	۴	۵	۵	۵	IV	
۷	۷	۷	۷	۷	۷	V (ماشین های لایه ریزی ۶۰ کیلوپوندی و جرتیل های چنگک دار ۱۵ کیلوپوندی) ۵۰۰ بار در روز ۲۰۰ بار در روز ۱۰۰ بار در روز ۴۰ بار در روز ۱۰ بار در روز ۴ بار در روز ۱ بار در روز	
۶	۶	۶	۶	۶	۶		
۶	۶	۶	۶	۶	۶		
۵	۵	۵	۵	۵	۵		
۵	۵	۵	۵	۵	۵		
۴	۴	۵	۵	۵	۵		
۴	۴	۴	۵	۵	۵		
۹	۹	۹	۹	۹	۹	VI (ماشین های لایه ریزی ۹۰ کیلوپوندی و جرتیل های چنگک دار ۲۰ کیلوپوندی) ۲۰۰ بار در روز ۱۰۰ بار در روز ۴۰ بار در روز ۱۰ بار در روز ۴ بار در روز ۱ بار در روز ۱ بار در هفته	
۸	۸	۸	۸	۸	۸		
۷	۷	۷	۷	۷	۷		
۶	۶	۶	۶	۶	۶		
۶	۶	۶	۶	۶	۶		
۵	۵	۵	۵	۵	۵		
۴	۴	۴	۵	۵	۵		
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	VII (ماشین های لایه ریزی ۹۰ کیلوپوندی و جرتیل های چنگک دار ۲۰ کیلوپوندی) ۱۰۰ بار در روز ۴۰ بار در روز ۱۰ بار در روز ۴ بار در روز ۱ بار در روز ۱ بار در هفته	
۹	۹	۹	۹	۹	۹		
۸	۸	۸	۸	۸	۸		
۷	۷	۷	۷	۷	۷		
۶	۶	۶	۶	۶	۶		
۵	۵	۵	۵	۵	۵		
۵	۵	۵	۵	۵	۵		



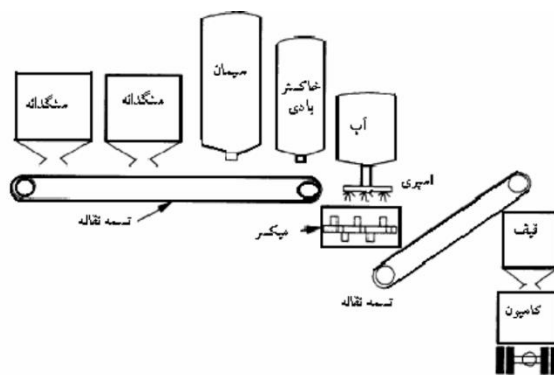
شکل ۲-۱۰ : نمودار طراحی ارائه شده توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا برای روسازی های بتن غلتکی [۶]

۲-۸ ساخت روسازی های بتن غلتکی

ساخت روسازی بتن غلتکی شامل ریختن و متراکم نمودن مخلوط خیلی سفت بتن به وسیله تجهیزات و تکنیک های مشابه با ساخت روسازی آسفالتی است. در روسازی بتن غلتکی از داول (میله های اتصال) ، آرماتور و قالب بندی استفاده نمی شود. این مسأله باعث می شود که به طور معمول صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه ها در مقایسه با روسازی بتنی ایجاد شود. عموماً ساخت روسازی بتن غلتکی شامل آماده سازی لایه های اساس و زیراساس، ساخت و حمل مخلوط، بتن ریزی، متراکم نمودن، ایجاد درزها و عمل آوری است [۱۱].

۲-۸-۱ آماده سازی لایه های اساس و زیراساس

لایه های اساس و زیراساس در روسازی بتن غلتکی باید همان الزاماتی که در روسازی بتنی معمولی وجود دارد، را دارا باشند. همچنین این لایه ها به منظور تأمین استحکام کافی به هنگام تراکم در زیر لایه روسازی بتن غلتکی ایجاد می شوند. لایه اساس در مکان هایی که سطح لایه روسازی در معرض سیکل های یخ زدن و ذوب شدن قرار دارد، غالباً نقش یک زهکش را برای جلوگیری از اشباع شدن این لایه، ایفا می کند. به منظور جلوگیری از جذب آب بتن لازم است تا حتماً قبل از بتن ریزی لایه اساس مرطوب شود [۱۱]. تولید بتن غلتکی با توجه به میزان آب اندک اختلاط، نیازمند نیروی بسیار زیادی برای ساخت مخلوطی همگن است. در تولید بتن غلتکی هم سیستم مخلوط کن پیوسته و هم سیستم مخلوط کن های تغاری به خوبی مورد استفاده قرار گرفته است. البته سیستم تولید پیوسته به دلیل سهولت حمل و نقل و نصب در کارگاه، داشتن ظرفیت نسبتاً زیاد تولید و راندمان اختلاط خوب، بیشتر متداول است (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۱ : سیستم تولید پیوسته بتن غلتکی

در سیستم پیوسته تولید بتن یک قیف بزرگ در انتهای تسمه نقاله برای کاهش ارتفاع ریزش بتن و در نتیجه کاهش جداشدگی به کار میرود. این قیف همچنین برای نگهداشتن موقت بتن هنگام تعویض کامیون های حمل بتن ضروری است. حداقل ظرفیت مخلوط کن باید ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت باشد. مگر در مواردی که حجم کار

کم است، سطح روسازی کمتر از ۱۰۰۰ مترمربع [۶]. در پروژه های کوچک که نصب سیستم تولید بتن با ظرفیت بالا توجیه پذیر نیست یک سیستم محلی اصلاح شده تولید بتن به صورت غیرپیوسته (توزین مصالح در هر مترمکعب) با ظرفیت حدود ۴۶ مترمکعب در ساعت به همراه تراک میکسرهای متداول بتن ریزی قابل قبول خواهد بود. عموماً کارگاه ساخت بتن تا حد ممکن نزدیک به محل بتن ریزی احداث می شود تا مدت زمان حمل بتن به حداقل برسد مدت زمان حمل بتن غلتکی از محل تولید تا دستگاه فینیشر بتن نباید بیشتر از ۱۵ دقیقه گردد. از دامپ تراک برای انتقال و ریختن بتن به دستگاه روسازی استفاده می شود. گاهی با توجه به شرایط برای پیشگیری از تأثیر عوامل محیطی همچون باران، باد، سرما و یا گرما بر روی مخلوط بتن باید روی این تراک ها پوشانده شود. بتن بطور مستقیم از داخل دامپ تراک به قیف دستگاه فینیشر ریخته می شود.

۲-۸-۲ بتن ریزی

معمولاً بتن غلتکی توسط دستگاه پخش آسفالت که برای پخش مقادیر زیاد مصالح، کمی اصلاح شده است پخش می گردد. این اصلاحات مشتمل بر بزرگ کردن دریچه بین قیف تغذیه و اسکرید و همچنین تنظیم پیچ های جلوی اسکرید برای اطمینان از پخش یکنواخت بتن در راستای محور جاده است که مشابه هنگامی است که آسفالت داغ ریخته می شود. حرکت بدون وقفه و پیوسته دستگاه پخش آسفالت به سمت جلو باعث می گردد تا از اینجا دست انداز و یا تورفتگی در سطح نهایی جلوگیری شود. این مسأله با تنظیم سرعت حرکت دستگاه با مقدار بتنی که داخل آن ریخته می شود قابل دستیابی است. مدل های جدید فینیشرها شامل یک یا چند میله کوبه ای متصل به قسمت ارتعاشی هستند که سبب افزایش انرژی تراکم و در نتیجه تأثیر مثبت در همواری سطح نهایی و افزایش دانسیته می شود. علی رغم افزایش انرژی تراکم گاهی بر روی سطح روسازی در پشت اسکریدهای سنگین، برخی ترکهای سطحی دیده میشود. این ترکها ممکن است به طور کامل بعد از عبور غلتک، از بین بروند. شکل این ترک ها به مقدار رطوبت مخلوط بتن غلتکی و میزان فشار وارد آمده از اسکرید به سطح بتن بستگی دارد. برخی از انواع فینیشرها خود قادرند تا حدود ۹۵ درصد دانسیته موردنظر را ایجاد کند؛ لذا عملیات غلتک زنی تسهیل شده و انحرافات طولی یا عرضی از تراز مورد نظر بسیار کاهش می یابد [۲۲].

قبل از ریختن بتن غلتکی سطح لایه اساس باید مرطوب گردد تا باعث جذب رطوبت از بتن غلتکی تازه ریخته شده نگردد. بسته به شرایط محیطی تا حدود ۴۵ و گاهی تا ۹۰ دقیقه پس از افزودن آب به مخلوط، بتن می تواند تازه و تراکم پذیر باشد. این محدودیت زمانی برای تراکم بتن، فاصله زمانی بین بتن ریزی مسیرهای متوالی را تحت تأثیر قرار میدهد. یک روش برای ایجاد هماهنگی زمانی بین بتن ریزی مسیرهای متوالی، محدود کردن طول مسیرهای بتن ریزی است. بسیاری از دستورالعمل ها حداکثر فاصله زمانی بین تولید بتن و اتمام عملیات تراکم را ۴۵ دقیقه تعیین می کنند [۲۳].

۲-۸-۳ تراکم

بتن غلتکی را معمولاً بلافاصله پس از ریختن، توسط یک غلتک ارتعاش دوتایی ۱۰ تنی متراکم می کنند. ابتدا غلتک به صورت استاتیک (بدون ارتعاش) دو عبور روی بتن ریخته شده خواهد داشت تا سطح بتن صاف و آماده شود (یک حرکت رفت و برگشت غلتک معادل دو عبور است). سپس چند عبور ارتعاشی انجام می شود تا دانسیته مشخص شده حاصل شود که معمولاً پس از چهار عبور و یا بیشتر به دانسیته مطلوب می توان دست یافت. پس از آن به منظور کاهش حفرات و بستن درزهای سطحی، معمولاً چند پاس حرکتی نیز توسط غلتک چرخ لاستیکی ۱۰ تا ۲۰ تنی انجام می شود. نهایتاً نیز ممکن است دوباره از غلتک بدون ارتعاش برای از بین بردن اثر غلتک چرخ لاستیکی یا غلتک ارتعاشی بر سطح بتن استفاده شود [۱۱]. در هنگام تراکم ارتعاشی، اپراتور غلتک نباید بر روی روسازی توقف کند. بهترین تراکم با فرکانس کم و دامنه ارتعاش زیاد و با سرعت حداکثر ۲ متر بر ساعت (۳/۲ کیلومتر بر ساعت) ایجاد می شود. برخی مراجع نیز سرعت ۲/۴ کیلومتر بر ساعت را پیشنهاد کرده اند [۶].

انجام تراکم شامل مراحل زیر است:

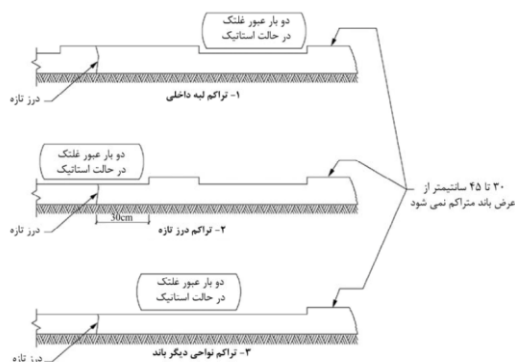
الف- متراکم نمودن لایه روسازی بتن غلتکی به وسیله غلتک ارتعاشی دوتایی، بلافاصله بعد از بتن ریزی، تا رسیدن به تراکم مورد نظر

ب- استفاده از غلتکی چرخ لاستیکی که پس از انجام تراکم چندین بار به صورت رفت و برگشتی سطح مورد نظر را طی کرده، تا سطحی یکنواخت و بدون شکاف بدست آید.

ج- در صورت لزوم، استفاده از غلتک استاتیک جهت از بین بردن جای چرخ غلتک های ارتعاشی و چرخ لاستیکی
ت- ساخت درزها

اکثر روسازی های بتنی غلتکی اولیه بدون درز اجرا می شدند و به همان صورت باقی می ماندند تا ترک های تصادفی با فواصل نامعین تشکیل شوند. ترک هایی که به این صورت تشکیل می شوند معمولاً عریض تر از آن بودند که بتوانند امکان انتقال موثر بار را فراهم سازند. محل درزها در روسازی بتن غلتکی از اهمیت زیادی در دستیابی به سطحی هموار و متراکم برخوردار است. درزهای طولی بین خطوط بتن ریزی در مسیر طولی جاده و درزهای عرضی در انتهای هر خط طولی، به صورت عمود بر مسیر طولی جاده تشکیل می شوند [۲۴]. درز گرم (تازه) بین لایه هایی که پشت سرهم ریخته شده اند ایجاد می شود، این درز زمانی ایجاد می شود که فاصله زمانی بین بتن ریزی و تراکم لایه ها به اندازه کافی کوتاه باشد؛ بطوری که لایه های مورد نظر پس از گیرش بصورت یک لایه واحد عمل می کنند. این فاصله ی زمانی به سرعت باد، دما و میزان رطوبت موجود در هوا بستگی دارد و معمولاً در حدود یک ساعت می باشد [۲۳]. شمای کلی درزهای تازه در شکل آمده است (شکل ۲-۱۲). استفاده

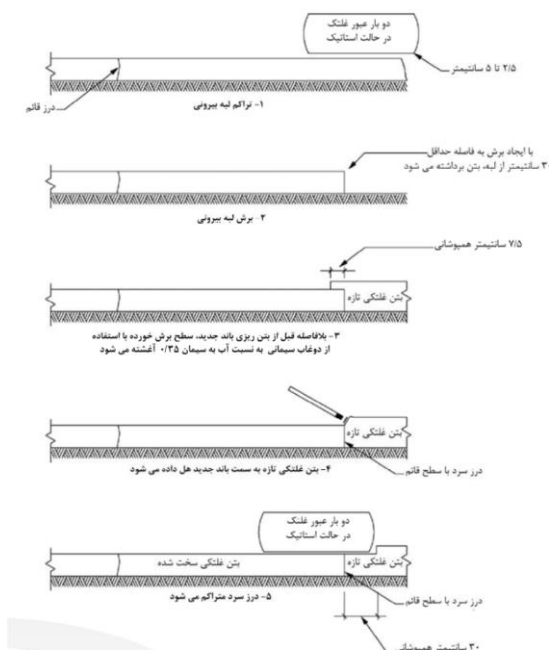
از مواد افزودنی دیرگیر کننده در مخلوط بتنی که در قسمت درزهای طولی ریخته میشود به منظور به تأخیر انداختن زمان گیرش بتن در این ناحیه توصیه شده است. بدین ترتیب درز طولی را می توان تا ۳ ساعت به صورت تازه نگه داشت [۶].



شکل ۲-۱۲ : نحوه اجرای درز تازه در روسازی بتن غلتکی [۶]

ث- درزهای اجرایی

درزهای اجرایی که اغلب درز سرد نامیده می شوند هنگامی تشکیل می گردند که در دو مسیر متوالی بتن ریزی، بتن لایه قدیمی تر به قدری سفت شده باشد که به همراه لایه جدید نتوان آن را متراکم نمود. در شکل ۲-۱۳ نحوه اجرای درزهای سرد و در شکل ۲-۱۴ نحوه اجرای درزهای طولی نشان داده شده است [۲۵].



شکل ۲-۱۳ : نحوه اجرای درز سرد در روسازی بتن غلتکی [۲۵]



شکل ۲-۱۴ : اجرای درزهای طولی

ج- درزهای انقباضی

در ابتدا بتن های غلتکی روسازی عمدتاً بدون درز انقباضی اجرا می شدند و اجازه ترک خوردگی به صورت طبیعی به بتن داده می شد تا در هزینه ها صرفه جویی شود. در نهایت مشخص شد که این امر موجب ایجاد ترک های بزرگ می شود که شکستگی لبه های این ترک ها هزینه های اضافی نگهداری و مرمت را به پروژه تحمیل می کند. لذا امروزه درزهای انقباضی در روسازی های بتن غلتکی نیز بریده می شوند. بریدن بتن توسط اړه بتن با تیغه حدود ۳ میلیمتر صورت می گیرد [۶]. درزهای انقباض که برای جلوگیری از انقباض و انبساط بتن ایجاد می شود، عموماً در این نوع روسازی اجرا نمی شود که این عمل باعث به وجود آمدن ترک هایی به صورت عرضی می شود، اما به نظر می آید این نوع ترک ها تاثیری در عملکرد سازهای روسازی نداشته باشد [۳].

از آنجا که بتن غلتکی مقدار آب کمی دارد، در نتیجه در اغلب پروژه ها پس از بتن ریزی عمل آوری مرطوب صورت می گیرد. عمل آوری مرطوب باعث پیشرفت روند کسب مقاومت طرح و جلوگیری از پوسته ای شدن سطح بتن سخت شده می شود. حداقل مدت عمل آوری عموماً ۷ روز است. در روز نخست لازم است توسط یک تانکر مجهز به اسپری آب پاشی، سطح بتن مرطوب نگه داشته شود. در ادامه مدت عمل آوری نیز می توان از سیستم های نصب شده آب پاشی، گونی خیس و یا تانکرهای آب پاشی استفاده کرد. با توجه به شرایط آب و هوایی گاهی ممکن است تانکرهای مجهز به آب پاشی توان کافی برای مرطوب نگه داشتن سطوح را نداشته باشند [۱۱]. عبور کلیه وسایل نقلیه به جز تانکرهای آب پاش تا قبل از ۱۴ روز از سطح بتن ریزی شده مجاز نیست. در اروپا به روسازی های بتن غلتکی که جهت جلوگیری از سایش سطح از یک لایه آسفالتی روی آن ها استفاده شده است، بعد از ۲۴ ساعت اجازه عبور ترافیک، افزایش می دهد اما تأثیر بارگذاری در سنین پایین بر دوام و خستگی این نوع بتن هنوز مشخص نشده است. برای عمل آوری مرطوب، در ۲۴ ساعت نخست بهتر است عمل آوری با ایجاد قطرات ریز آب به صورت مه انجام پذیرد؛ چرا که سطح بتن هنوز گیرش کافی پیدا نکرده و ممکن است اسپری آب بر روی آن باعث شسته شدن سنگدانه ها در سطح شود [۲۲]. برخی محققین عمل آوری مرطوب و آب دهی

سطح بتن غلتکی روسازی را بدلیل آنکه ممکن است آب به لایه های اساس و زیراساس نیز نفوذ کرده و باعث تضعیف آن شود پیشنهاد نمی کنند و برای پیشگیری از این مشکل استفاده از مواد عمل آوری را توصیه می کنند. اسپری کردن مواد عمل آوری روی سطح باید در دو لایه عمود بر هم انجام شود. مقدار استفاده از مواد عمل آوری در روسازی بتن غلتکی با توجه به نوع بافت سطحی آن، در مقایسه با روسازی بتن معمولی کمی بیشتر است [۲۶]. درخصوص تأثیر روش عمل آوری بر خواص بتنهای غلتکی روسازی، تحقیق آزمایشگاهی انجام شده در داخل کشور نشانگر کاهش ۵۰ درصدی مقاومت در صورت عدم اعمال عملآوری مرطوب و نگهداری نمونه ها در شرایط رطوبت نسبی ۴۰ درصدی است [۶].

۲-۹ کاربرد های روسازی بتن غلتکی :

نخستین جاده ی ساخته شده به وسیله ی بتن غلتکی، جاده یاکیمیا - واشنگتن در آمریکای شمالی است که در سال ۱۹۴۲ توسط اداره ی مهندسی ارتش آمریکا طراحی و اجرا شده است. البته بر اساس گزارش های موجود، در دهه ی، ۱۹۳۰ نمونه های مشابه در سوئد نیز اجرا شده است [۲۷]. در دهه، ۱۹۸۰ برنامه های تحقیقاتی گسترده ای در زمینه روسازی های بتن غلتکی توسط ارتش آمریکا به عمل آمد. بر اساس گزارشات در سال، ۱۹۸۷ گروه محققین ارتش آمریکا، ابتدا یک جاده به طول ۱۰۵ فوت و عرض ۱۲ فوت از بتن غلتکی جادهای ساختند که عملیات میدانی بر روی آن انجام گرفت [۲۸]. تاکنون عمده کاربرد روسازی بتن غلتکی در محوطه های روباز کارخانجات، جاده های دسترسی معادن، سطوح محوطه های بارانداز بندر، ترمینال های وسایل نقلیه سنگین و نظامی، محوطه های پارکینگ اتومبیل ها و کامیون ها و سطوح انبارها، محل پارکینگ هواپیماها در فرودگاه ها، جاده های فرعی و یا خیابان های با سرعت پایین و متوسط بوده است [۲۹].

در ادامه به طور مختصر زمینه های کاربرد روسازی های بتن غلتکی همراه با مثالهای کاربردی پرداخته شده است:

۲-۹-۱ کاربرد جهت کف انبارهای سرپوشیده و روباز و محوطه های چوب و الوار و ذغال سنگ

اولین کاربرد روسازی بتن غلتکی در کانادا در سال ۱۹۷۶ در محوطه انبارسازی و تفکیک کارخانه چوب و الوار در ونکوور بوده است. این سیستم جدید جایگزین سیستم قبلی متداول در کانادا گردید، که شامل ساخت یک لایه اساس از مخلوط تثبیت شده به ضخامت ۳۵ سانتی متر و اجرای روسازی آسفالتی روی آن بود. دلیل آن هم بهبود دوام روسازی اجرا شده با روش جدید بتن غلتکی در برابر بارهای سنگین اعمال شده بود. محوطه مذکور از سال ۱۹۷۶ تاکنون به طور مداوم در حال استفاده می باشد. در سال ۱۹۸۵ در ونکوور محوطه انبار صنایع الوار که روسازی قبلی آسفالتی آن کاملاً تخریب شده بود با روسازی بتن غلتکی به ضخامت ۲۹ سانتیمتر بازسازی شد. در سال ۱۹۸۶ در ادمونتون کانادا ۲۰ هزار مترمربع روسازی بتن غلتکی برای محوطه انبار روباز صنایع الوار اجرا

شد که بعد از عملکرد مثبت آن ۶۵ هزار مترمربع محوطه دیگر نیز با این روش ساخته شد [۳۰]. در سال ۱۹۸۳ در کانادا جاده دسترسی معدن زغال سنگ به طول ۲۰ کیلومتر با بارگذاری وسایل نقلیه سنگین با روسازی بتن غلتکی به ضخامت ۱۸ سانتیمتر احداث گردید. به علت درشتی اندازه حداکثر سنگدانه به کار رفته برابر ۴۰ میلیمتر، کیفیت تردد پایین و سطح جاده ناهموار بود و لذا جهت بهبود وضعیت روی بتن غلتکی یک لایه آسفالتی به ضخامت ۴۰ میلیمتر اجرا گردید [۳۱].

۲-۹-۲ روسازی های باراندازها و بندرگاه ها

عملکرد خوب روسازی بتن غلتکی تحت بارهای سنگین باعث استفاده از آن در باراندازها و محوطه های تبادل بار در ترمینال ها شده است. در سال ۱۹۸۹ در هوستون ایالات تگزاس اولین روسازی بتن غلتکی تحت بارهای سنگین توسط بخش خصوصی در آمریکا ساخته شد. این روسازی ها به مساحت ۴۵۰۰۰ مترمربع برای ایجاد محوطه تبادل بار ریلی و کامیونی ساخته شد.



شکل ۲-۱۵: روسازی بتن غلتکی استفاده شده در ترمینال باری تگزاس [۳۰]

در سال ۱۹۸۷ در شهر آستین از ایالات تگزاس، ترمینال باری شرکت سنترال فریت (شکل ۲-۱۵) جهت محوطه مانور و بارگیری تریلی ها و کامیون ها با روسازی بتن غلتکی ساخته شد. ضخامت این روسازی ۱۷۸ میلیمتر بود که روی لایه اساس خاک تثبیت شده با آهک به ضخامت ۱۵۲ میلیمتر احداث گردید [۳۰].

۲-۹-۳ روسازی جاده های ویژه وسایل نقلیه سنگین کم سرعت و وسایل نظامی زنجیردار

در آمریکا در اوایل دهه ۱۹۸۰ گروه مهندسين ارتش آمریکا روسازی آزمایشی بتن غلتکی را در پادگان اف.تی. استوارت به ضخامت ۲۳ تا ۳۳ سانتی متر برای تردد وسایل نقلیه نظامی زنجیردار نظیر زره پوش احداث کردند و در همان سال جاده آزمایش تانک به ضخامت ۲۵ تا ۳۳ سانتی متر در اف.تی. گردن ساخته شد. در سال ۱۹۸۴ در اف.تی. هود در ایالت تگزاس ۱۷۰۰ مترمربع روسازی بتن غلتکی با ضخامت ۲۵ سانتیمتر با

مقاومت خمشی ۵/۵ مگاپاسکال جهت توقفگاه وسایل نظامی سنگین ساخته شد. ارزیابی روسازی بتن غلتکی در اف.تی.هود بعد از دو سال نشانگر عملکرد خوب آن بود؛ هرچند مقداری خرابی در بتن در لبه درزها و ترک ها مشاهده شد [۲۵]. به دنبال مطالعات انجام گرفته توسط گروه مهندسين ارتش آمريكا و گزارش های موجود مبنی بر موفقیت آمیز بودن پروژه های اجرا شده بتن غلتکی، نخستین پروژه با مقیاس کامل توسط مهندسين ارتش آمريكا مربوط به ساخت پارکینگی برای تجهیزات نظامی در تگزاس بود. وسعت پروژه مذکور ۱۵۱۷۵ مترمربع و ضخامت آن ۲۵۴ میلیمتر بود. مقاومت خمشی به دست آمده از این جاده ۵/۵ مگاپاسکال بود. با انجام این پروژه که در مقیاس کامل انجام گرفت مهندسين اطلاعات ارزشمندی از شرایط دانه بندی، نحوه تراکم، بتن ریزی، تعداد لایه ها و نحوه ساخت درزها به دست آوردند [۳۲].

۲-۹-۴ جاده های با شیب زیاد

روسازی بتن غلتکی و اصولاً روسازیهای بتنی، در شیبها دارای عملکرد خوبی هستند. از روسازی بتن غلتکی در جاده های دسترسی سازه های زیرزمینی در سوئد که در سال ۱۹۸۸ برای مقاصد هسته ای به عمق ۵۰ متر زیر کف دریا ساخته شده اند، از جاده با شیب حدود ۱۲/۶ درصد استفاده شده است [۲۸].

۲-۹-۵ روسازی راه های با تردد و سرعت کم و خیابان های شهری و بین شهری

علاوه بر روسازی با باربری سنگین، به کاربرد روسازی بتن غلتکی برای خیابان های با ترافیک کم تا متوسط و راه های بین شهری درجه ۲ نیز توجه شده است. ساخت خیابان های شهری با روسازی بتن غلتکی در شهرهای متعددی نظیر پرتلند، آرگون، رجینا، آستین و ساسکا تجوان گزارش شده است. در سال ۱۹۸۵ در شهر آرگون آمريكا اولین روسازی بتن غلتکی شهری به صورت آزمایشی به طول حدود ۱۵۰ متر و پهنای ۸ متر با ضخامت ۱۸ سانتیمتر اجرا گردید. در سال ۱۹۸۷ در شهر آستین تگزاس، روسازی خیابان توسکانی وی اجرا گردید. قیمت تمام شده این روسازی بتن غلتکی به طول ۸۰۰ متر و پهنای ۲۰ متر از قیمت گزینه آسفالتی که متشکل از ۲۵/۵ سانتی متر لایه اساس سنگ آهک خرد شده روی ۱۵ سانتی متر اساس تثبیت شده و پوشش ۶۳/۵ سانتی متر آسفالت گرم بود، ارزانتر ارزیابی گردید [۳۱].

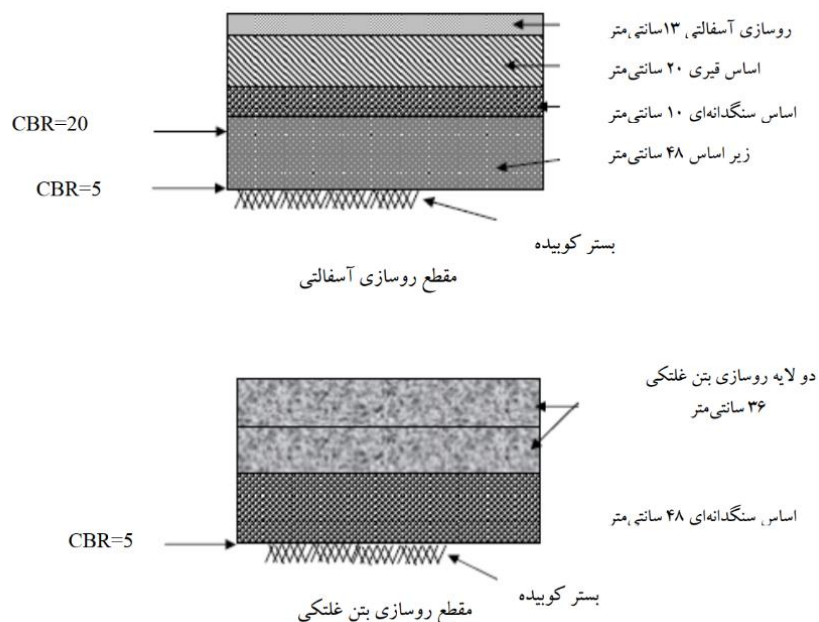
۲-۹-۶ پارکینگ اتومبیل ها و راه های تردد داخلی سازمان ها

در سال، ۱۹۸۵ مهندسين ارتش آمريكا دو محدوده ی بزرگ از جاده ای که در مجموع ۶/۹ هکتار مساحت داشت را با استفاده از بتن غلتکی در واشنگتن اجرا کردند [۴]. در سال ۱۹۸۷، نخستین بتن غلتکی در ژاپن به کار گرفته شد و این روند تا سال ۱۹۹۷ ادامه یافت و حدود ۱۸۰۰۰۰۰ متر مربع بتن ساخته شد. بزرگترین پروژه ی روسازی که تاکنون با استفاده از بتن غلتکی اجرا شده است مربوط به کارخانه ی خودرو سازی ژنرال موتورز در نزدیکی

تنسی می باشد. این پروژه مساحتی در حدود ۵۴۳۴۶۴ مترمربع و ضخامتی در حدود ۲۵۳ تا ۲۵۴ میلیمتر دارد که در سالهای ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹ ساخته شده است [۳]. در سال ۱۹۸۹ یک شرکت خودروسازی در نزدیکی شهر اسپرینگ هیل ایالت تنسی، محوطه های پارکینگ اتومبیل به مساحت ۵۴۵۰۰۰ مترمربع را با روسازی بتن غلتکی به ضخامت ۱۸ تا ۲۵ سانتیمتر احداث نمود [۳۳]. در سال ۱۹۹۲ شرکت سیف وی از روسازی بتن غلتکی جهت اجرای روسازی انبارهای خود در شهر تریسی ایالت کالیفرنیا به مساحت ۲۲۶۰۰۰۰ مترمربع استفاده کرد. ضخامت روسازی از ۱۸ تا ۲۰ سانتی متر بوده است [۱۸].

۲-۹-۷ فرودگاه ها

یکی از اولین کاربردهای روسازی بتن غلتکی در ساخت باند فرودگاهی در یاکیما در ایالت واشنگتن توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا در سال ۱۹۴۲ بوده است. در سال ۱۹۸۵ روسازی بتن غلتکی جهت توقفگاه هواپیما به مساحت ۳۶۰۰۰ مترمربع در فرودگاه بین المللی پرتلند اجرا شد. برای فرودگاه شهر پرتلند، دو گزینه روسازی آسفالتی و روسازی بتن غلتکی مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی اقتصادی انجام شده نشانگر کاهش هزینه های اجرا به میزان ۳۲ درصد در صورت انتخاب گزینه بتن غلتکی بوده است. در شکل ۲-۱۶ مقایسه طراحی روسازی بتن غلتکی با روسازی آسفالتی با باربری برابر ارائه شده است [۲۲]. در سال ۱۹۸۹ نیز بتن غلتکی برای اجرای روسازی توقفگاه هواپیما در پایگاه نظامی اندروز نزدیک شهر واشنگتن به کار رفت [۱۸].



شکل ۲-۱۶: مقایسه ضخامت طراحی روسازی در فرودگاه پرتلند با گزینه های آسفالتی و بتن غلتکی [۲۲]

در سطح کشور در برخی مکانها از روسازی بتن غلتکی استفاده شده است که چند مورد در این قسمت آورده شده است.

- شهرداری منطقه ۲۲ تهران سال ۸۸
- خیابان ها و محوطه سازی مسکن مهر هشتگرد سال ۹۱
- روسازی محور شمالی کارخانه سیمان مشهد سال ۹۱
- روسازی تونل نیایش سال ۹۱
- جاده ویژه جنگل گلستان
- محور فرارت-بی بی سکینه در منطقه شهریار استان تهران
- بزرگراه امام علی و آزادگان تا پل شهید کریمی
- معابر شریانی ۳۵ متری شمال بزرگراه شهید همت
- ایستگاه های اتوبوس تندرو استان تهران و تبریز

بخش دوم : پیشینه علمی موضوع

بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه بتن غلتکی بر پایه بررسی توانایی مصالح محلی در ساخت بتن غلتکی استوار بوده است. همچنین روشی که گروه های تحقیقاتی در ساخت نمونه های بتن غلتکی به کار گرفته اند متفاوت با یکدیگرند.

بانثیا و همکاران^۵ به بررسی تاثیر نسبت های مختلف آب به سیمان، میکروسیلیس و روشهای مختلف عمل آوری روی ضریب نفوذپذیری پرداختند. نتایج آزمایش نشان داد استفاده از میکروسیلیس، نفوذپذیری را با گذشت زمان به شدت کاهش می دهد. افزایش نسبت آب به سیمان تاثیر محسوسی روی نفوذپذیری بتن غلتکی نداشت. در بخش دیگر این تحقیق، دوام بتن در برابر یخ زدگی- ذوب شدگی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق نمونه های ساخته شده با طرح اختلاط های مختلف تا ۳۰۰ سیکل یخ زدگی- ذوب شدگی بدون آسیب باقی ماندند. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از این بود که نحوه عمل آوری هیچ تاثیر محسوسی روی

^۵ Banthia et al

نفوذپذیری و دوام در برابر یخزدگی- ذوب شدگی بتن غلتکی ندارد. نهایتاً مشخص گردید که نفوذپذیری بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است [۳۴].

فردین و همکاران^۶ در تحقیقی با هدف بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن فشرده غلتکی مورد استفاده با سنگدانه های بتنی بازیافتی RCA به عنوان جایگزینی برای سنگدانه درشت طبیعی انجام شده است. چهار مخلوط RCC از نسبتهای مختلف ترکیب RCA (۰-۵-۱۵-۳۰) درصد تولید شد. آزمون تراکم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته، تخلخل، چگالی و جذب آب برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی و فیزیکی مخلوط ها انجام شد. از تحلیل واریانس یک طرفه ANOVA برای شناسایی تأثیر RCA بر خواص مکانیکی RCC استفاده شد. با افزایش RCA در مخلوط ها، برخی خواص مکانیکی مانند مدول الاستیسیته کاهش می یابد. همه RCC ها مقاومت فشاری بیش از ۱۵ مگاپاسکال را در ۲۸ روز نشان دادند، همچنین مقاومت کششی را بالای ۱/۹ مگاپاسکال، مقاومت خمشی را بالای ۲/۹ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته را بالاتر از ۱۹ GPa نشان دادند [۳۵].

سان و همکاران^۷ تأثیر خاکستر بادی را روی پدیده ی خستگی در بتن غلتکی بررسی کرده و روابطی را در این زمینه برای خستگی بتن غلتکی در حالت استفاده و عدم استفاده از خاکستر بادی در بتن غلتکی استخراج نمودند که از آن ها می توان برای طراحی ضخامت روسازی بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی بهره برد. براساس نتایج این تحقیق، بتن غلتکی از مقاومت خستگی بهتری در مقایسه با بتن معمولی برخوردار است. همچنین مقاومت بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی در برابر خستگی به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد نسبت به مقاومت بتن غلتکی بدون خاکستر بادی بیشتر می باشد، که این موضوع را به کاهش فضاهای خالی موجود در بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی نسبت به بتن غلتکی بدون خاکستر بادی در اثر تراکم ربط دادند. در راستای همین تحقیق، تحقیقات گسترده ای که در برزیل در زمینه رفتار خستگی روسازی بتن غلتکی انجام گرفت، نشان داد که این روسازی ها دارای رفتار خستگی مشابه روسازی های بتنی معمولی می باشد [۳۶].

استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی های بتن غلتکی با استفاده از مصالح بازیافتی یک امر حیاتی از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی است. به همین منظور کورارد و همکاران^۸ به بررسی امکان استفاده از مصالح بازیافتی از روسازی های بتنی در روسازی های بتن غلتکی پرداختند. با انجام آزمایش های لازم مشخص شد که وزن مخصوص بالک و ویژه مصالح بازیافتی، بالا و نزدیک به وزن مخصوص سنگدانه های طبیعی بوده است. همچنین پس از انجام آزمایش های مقاومت در برابر گسیختگی مصالح و اندازه گیری ضریب لس آنجلس، مشخص شد که این مصالح

^۶ Fardin et al

^۷ Sun et al

^۸ Coard et al

شرایط لازم برای به کارگیری در طرح اختلاط بتن غلتکی را دارا می باشند. در مقایسه بین نمونه های ساخته شده از مصالح طبیعی و بازیافتی مشخص شد که تراکم بخش جامد در هر دو طرح اختلاط در محدوده یکسانی قرار دارد؛ اما انرژی لازم برای تراکم بتن غلتکی ساخته شده با مصالح بازیافتی بسیار بیشتر است. این امر به دلیل جذب آب بسیار بالای مصالح بازیافتی است. در بررسی مقاومت فشاری نیز نمونه های ساخته شده با مصالح طبیعی مقاومت بالاتری از خود نشان داده اند. از دیگر نتایج این تحقیق می توان به این موضوع اشاره کرد که بهینه رطوبت لازم برای طرح اختلاط این سنگدانه ها محدوده بزرگی را در برمی گیرد که این امر با توجه به شرایط موجود در کارگاه های ساخت بسیار مفید است؛ زیرا اگر شرایط محیطی تغییر کند اصلاح میزان آب هیچ تغییر اساسی را روی شرایط کار و خواص نهایی بتن ایجاد نمی کند [۳۷].

در مطالعه ای که توسط آقایان و خفاجه انجام شد، ارزیابی چرخه عمر محیطی روسازی بتن غلتکی حاوی مصالح ضایعات سرامیکی و پودر ذغال سنگ مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی و دوام RCCP مورد آزمایش قرار گرفت. ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ۲۵ درصد مصالح ضایعات سرامیکی، به عنوان جایگزین مصالح طبیعی درشت دانه و پودر ذغال سنگ ۴ و ۸ درصد جایگزین وزن سیمان شد. نتایج نشان داد که استفاده از ضایعات سرامیکی زمان تراکم و چگالی مخلوط های تازه را بترتیب افزایش و کاهش می دهد. روش ارزیابی چرخه عمر نشان داد که استفاده از این مواد باعث کاهش گازهای گلخانه ای شده است و ۱۵ درصد از ضایعات سرامیکی و ۸ درصد از پودر ذغال سنگ گازهای گلخانه ای را تا ۱۰ درصد کاهش داد. همچنین، ترکیب سرامیک و پودر ذغال سنگ با کاهش ۹ درصدی بیشترین تأثیر مثبت را بر شاخص گرمایش جهانی نشان داد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل ریزساختار بتن با تصاویر SEM انجام شد و دوام RCCP اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که پس از جایگزینی ۱۵٪ مصالح سرامیکی جایگزین درشت دانه، مقاومت فشاری ۹۰ روزه، کششی و خمشی به ترتیب ۱۴٪، ۳۹٪ و ۲۰٪ افزایش یافته است. همچنین استفاده از سنگدانه های سرامیکی باعث افزایش دوام بتن پس از ۹۰ روز می شود. به طور کلی، استفاده از این مواد زائد در RCCP نه تنها می تواند انتشارات و مسائل مربوط به گرمایش جهانی را کاهش دهد، بلکه می تواند خواص مکانیکی RCCP را افزایش داده و مقدار زیادی مواد زائد را بازیافت کند [۳۸].

در تحقیقی که توسط رحمانی و شربت دار صورت گرفت، چگونگی تأثیر محتوای سیمان (یا نسبت سیمان به سنگدانه ها) بر پارامترهای شکست و شکل پذیری روسازی بتنی غلتکی مورد بررسی قرار داد. برای این منظور، آزمایش های خمشی سه نقطه ای بر روی نمونه های تیری با چندین نسبت سیمان به سنگدانه (از ۱۲ تا ۱۷ درصد) انجام شد. برای همه مخلوط ها، سه رویکرد، شامل روش شکست از کار WFM، روش اثر اندازه SEM و روش اثر مرزی BEM برای ارزیابی پارامترهای شکست مورد استفاده قرار گرفت. از این نظر، با افزایش نسبت سیمان به سنگدانه از ۱۲ به ۱۷ درصد: ۱- انرژی شکست اولیه و انرژی شکست کل در هر سه روش کمی افزایش

یافت. ۲- سختی شکست در روشهای SEM و BEM کمی افزایش یافته است و با توجه به نمودار اثرات سایز ، عملکرد نمونه های RCCP به معیارهای مکانیکی شکست الاستیک خطی نزدیک شده است [۳۹].

۲-۱۰ پژوهش های انجام شده با استفاده از خرده لاستیک در روسازی بتن غلتکی :

امروزه با توجه به نیاز بشر به حمل و نقل و رشد صنایع لاستیک هرساله حجم انبوهی لاستیک وارد محیط زیست می شود. به همین دلیل این تحقیق در مورد خرده های لاستیک فرسوده در روسازی بتن غلتکی می باشد. خصوصیات اصلی بتن مانند وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای نخستین بار از خرده لاستیک در روسازی آسفالتی در دهه ۱۹۹۰ استفاده شد. براساس تحقیقات انجام گرفته استفاده از دانه های لاستیکی در روسازی آسفالتی سبب کاهش هزینه های نگهداری ، افزایش عمر سرویس دهی و کاهش آلودگی صوتی ناشی از تردد وسایل نقلیه می شود. حجم بالای لاستیک های فرسوده و نیاز به انبار کردن آن سبب مشکلات زیادی از جمله بیماری و آتش سوزی می شود. در اواخر قرن بیستم، صنعت بازیافت در ۸ کشور پیشرفته صنعتی بعنوان سودآورترین صنعت ، برنده جایزه طلایی گردید و از آن زمان زباله را طلای کثیف نامیدند [۴۰].

در پژوهشی که توسط صابری کرهرودی انجام شد، خرده لاستیک با اندازه تقریبی ماسه به میزان ۵-۱۰-۱۵-۲۰ درصد جایگزین سنگدانه طبیعی شده است و برخلاف اثر کاهشی که خرده لاستیک بر مقاومت بتن معمولی داشته، می توانند در بتن غلتکی تا درصد مشخصی سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی شوند. همچنین نتایج نشان داده اند که دانه های لاستیک درصد جذب آب نمونه بتنی را کاهش می دهند بطوریکه با افزایش درصد دانه های لاستیک در بتن، مقدار جذب آب کاهش می یابد. برخلاف بتن معمولی که افزایش مقاومت فشاری از ۷ تا ۲۸ روز حدود ۳۰٪ است در بتن لاستیکی افزایش مقاومت حدودا ۳۶-۴۶٪ است. افزودن دانه های لاستیکی تا حدی سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می شود. افزودن ۱۰٪ خرده لاستیک مقاومت فشاری بتن را بیش از ۹٪ افزایش می دهد. برخلاف مقاومت فشاری درصد افزایش مقاومت خمشی از سن ۷ تا ۲۸ روزگی مقداری کمتر است. (حدود ۱۸٪) همچنین خرده لاستیک تا حدی سبب افزایش مقاومت خمشی نمونه های بتنی می شود. استفاده از دانه های لاستیکی تا حدودی مقاومت خمشی بتن را افزایش می دهد. بطوریکه برای مخلوط دارای ۵ درصد خرده لاستیک بیشترین مقاومت خمشی بدست آمد [۴۱].

در تحقیقی که توسط عسکری در سال ۱۳۹۷ صورت گرفت به بررسی اثر استفاده از خرده های لاستیک در روسازی های بتن غلتکی با استفاده از الیاف پلیمری پرداخته شده است و سعی شده است که خصوصیات اصلی بتن شامل وزن مخصوص، مقاومت فشاری ، مقاومت خمشی و درصد جذب آب مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین

خرده های لاستیک با اندازه تقریبی ماسه به اندازه ۵ - ۱۰ - ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزین سنگدانه های طبیعی شده است. براساس نتایج بدست آمده برخلاف اثر کاهشی که خرده های لاستیک بر مقاومت بتن های معمولی داشته اند، می توانند در بتن غلتکی تا درصد مشخصی سبب افزایش مقاومت خمشی و فشاری شوند. همچنین نتایج نشان می دهند که دانه های لاستیک، درصد جذب آب نمونه های بتنی را کاهش می دهند بطوریکه با افزایش درصد دانه های لاستیک در بتن، مقدار جذب آب کاهش می یابد [۴۲].

نتایج مطالعه انجام شده توسط فخری و صابری نشان می دهد افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روز را برای مقادیر مختلف لاستیک ۵٪ و ۱۰٪، بدون بخار سیلیس (با ۱۰ درصد محتوی لاستیک، مقاومت فشاری حدوداً ۴۴ مگاپاسکال) و ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪، با بخار سیلیس (با ۱۰ درصد محتوی لاستیک، مقاومت فشاری حدوداً ۶۰ مگاپاسکال)؛ با این حال، مقاومت فشاری برای نمونه های دیگر در مقایسه با نمونه کنترلی کاهش می یابد. به طور مشابه، افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روز برای نمونه هایی که حاوی ۵٪ لاستیک خرد شده با و بدون بخار سیلیکا هستند (بدون سیلیکا حدوداً ۶ مگاپاسکال و با سیلیکا حدوداً ۷ مگاپاسکال) بدست می آید، اگرچه مقاومت خمشی برای مخلوط های دیگر کاهش می یابد [۴۳].

فخری و عموسلطانی تجزیه و تحلیل رفتار ترک خوردگی مخلوط های بتن غلتکی شامل آسفالت بازسازی شده و لاستیک خرد شده را مورد بررسی قرار داد. به طور کلی، مشخص شد که با افزایش مقدار سیمان از ۱۲٪ تا ۲۰٪، سختی شکست در تمام مخلوط ها افزایش می یابد. مخلوط های لاستیکی ساخته شده نشان می دهد که مقادیر چقرمگی شکست بیشتر، در مقایسه با مخلوط شامل آسفالت احیا شده RAP دارند. همچنین نشان دادند که ترکیب آسفالت احیا شده RAP و مواد لاستیکی در RCCP انرژی جذب را افزایش می دهد. درحالیکه، سختی و مدول الاستیسیته با افزودن RAP یا لاستیک کاهش می یابد. در مقابل، چقرمگی با افزایش محتوای سیمان بیشتر شد که به طور کامل طبیعت شکننده مخلوط بتنی سخت تر را نشان می دهد [۴۴].

سلیح و آبد^۹ اثر روش های مختلف عمل آوری را با درصد های جایگزینی مختلف ریزدانه بر روی خواص بتن غلتکی مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که بهترین درصد استفاده ۵ درصد به عنوان یک درصد (حجمی) جایگزین ریزدانه است. برخی محققان نشان دادند که ترکیب لاستیک باعث تغییر رفتار بتن غلتکی می شود. در حضور لاستیک، بتن غلتکی منعطف تر می شود. ضعف اصلی ترکیب لاستیکی کاهش خواص مکانیکی RCC بود. برای حل این مشکل، بخار سیلیکا به ذرات لاستیک افزوده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که عملکرد RCCP را می توان با اصلاح زبری سطح ذرات لاستیکی بهبود بخشید [۴۵].

^۹ Salih & abed

آدامو، محمد و لیو^{۱۰} در پژوهشی نشان داد که عملکرد خستگی روسازیهای RCC با جایگزینی جزئی مصالح ریزدانه با لاستیک خرد شده و افزودن نانو سیلیس افزایش می یابد. با این حال، استفاده از خاکستر بادی با حجم بالا HVFA عملکرد خستگی RCC را کاهش می دهد[۴۶].

گنجیان و همکاران : با افزایش مقدار دانه های لاستیکی جایگزین با شن و سیمان ، مقاومت فشاری و خمشی برای هر دو نوع مخلوط کاهش می یابد. در این مطالعه دانه های لاستیک جایگزین ۵ - ۷/۵ - ۱۰ درصد شن و سیمان شدند. نتایج نشان داد افزودن دانه های لاستیک سبب کاهش مقاومت می شود ولی بیان دو نکته حائز اهمیت است : اول اینکه ۵ درصد دانه های لاستیکی در مقاومت فشاری یا خمشی تغییر چندانی ایجاد نمی کند. دوم مقاومت فشاری نمونه با دانه های لاستیکی جایگزین شن بیشتر از نمونه با دانه های لاستیکی جایگزین سیمان است. اما برای مقاومت خمشی برعکس است. بنابراین نمونه با دانه بندی لاستیکی بزرگتر مقاومت فشاری بیشتر و مقاومت خمشی کمتر دارد[۴۷].

ارزیابی بتن غلتکی حاوی خرده لاستیک جایگزین ریزدانه با درصدهای ۵-۱۰-۱۵-۲۰-۲۵-۳۰-۳۵ با یا بدون افزودنی میکروسیلیس که ۱۰ درصد جایگزین سیمان توسط می شود توسط فخری و صابری انجام شده است. استفاده از خرده های لاستیک فرسوده در مخلوط بتن غلتکی تا حدودی سبب افزایش مقاومت فشاری می شود. بیشترین مقدار مقاومت فشاری برای بتن دارای ۱۰ درصد دانه های لاستیکی اتفاق می افتد. مقاومت نمونه های با ۵ و ۱۰ درصد دانه های لاستیک و بدون افزودنی میکروسیلیس، از مقاومت نمونه کنترلی بیشتر است. همچنین مقاومت نمونه های دارای ۵-۱۰-۱۵-۲۰ درصد دانه های لاستیک که با افزودنی میکروسیلیس ساخته شده اند از نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس بیشتر شد. که این نشان از اثر زیاد میکروسیلیس در بتن دارای دانه های لاستیکی می دهد. در مورد مقاومت خمشی نیز مخلوط دارای ۵ درصد خرده لاستیک بیشترین مقاومت خمشی را بدست می دهد. همچنین استفاده از میکروسیلیس در افزایش مقاومت خمشی تاثیر گذار است[۴۰].

سوکونتاسوکول و همکاران (۲۰۰۹)^{۱۱} از خرده های لاستیک در درصد های ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین ماسه در بتن استفاده نمودند. براساس نتایج خرده لاستیک سبب کاهش مقاومت خمشی بتن می شود بطوریکه برای مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد مقاومت خمشی ب ترتیب ۲۸ و ۷۳ درصد نسبت به بتن کنترلی کاهش یافت[۴۸].

مطالعه ای توسط فخری و همکاران با هدف بررسی تأثیر مواد زاید مخلوط های RCC با RAP یا لاستیک خرد شده ، به عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه ها ، بر خصوصیات مکانیکی روسازیهای بتنی با اندازه گیری انرژی جذب شده و سختی این مخلوط ها انجام شده است. با استفاده از این روش ، ۵۶ مخلوط RCCP با طرح اختلاط های

^{۱۰} Adamu, Mohamad, liu

^{۱۱} sokontasukul

مختلف و مواد زائد از ۲۵٪ - ۵۰٪ - ۱۰۰٪ RAP و ۵٪ - ۱۰٪ - ۲۵٪ لاستیک خرد شده در آزمایشگاه ساخته شدند. ۳ نمونه تیر ۷۰×۷۰×۲۴۰- میلیمتر در هر مخلوط ترکیب شده برای انجام آزمایش تیر ۴ نقطه ای ساخته شد. نتایج نشان می دهد که مقاومت فشاری و خمشی نمونه های RCC با استفاده از مقدار لاستیک ۵٪ کمی بهبود یافته است (حدود ۵٪). در مقابل، کاهش زیادی در مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها هنگام افزایش محتوای RAP مشاهده می شود. با این وجود این آزمایشات آزمایشگاهی معمولی نمی تواند معیار مناسبی برای تعیین ترکیب بهینه داشته باشد. بنابراین، یک آزمایش ثانویه برای اندازه گیری انرژی جذب شده و سختی مخلوط ها انجام شده است که معیارهای امیدوار کننده برای نمونه های RCC با ترکیب مواد زاید هستند. نتایج یک روند افزایشی چقرمگی و جذب انرژی را در نمونه های ادغام شده با مواد زائد نشان می دهد. از اینرو با توسعه روابط مختلف با استفاده از تحلیل واریانس ANOVA و تحلیل رگرسیون، مفهوم جذب انرژی برجسته شد. نتایج رگرسیون نشان می دهد که ترکیب حداکثر ۱۰٪ لاستیک و ۵۰٪ RAP می تواند برای افزایش عمر روسازی با افزایش سختی و جذب انرژی مخلوط ها مقرون به صرفه و سودمند باشد. بدیهی است، مخلوط های دارای ۵۰٪ و ۱۰۰٪ RAP، نیاز به حداقل مقاومت فشاری را در دانه بندی درجه ACI برآورده نمی کنند، اما با افزایش محتوای سیمان (تا ۳۵۰ کیلوگرم در هر متر مربع بتن) در دانه بندی شماره PCA، مخلوط های حاوی ۵۰٪ RAP می توانند این نیاز را برآورده کنند. با این وجود، تحقق حداقل نیاز برای مخلوط های حاوی ۱۰۰٪ RAP امکان پذیر نیست. روند کلی کاهش مقاومت با افزایش RAP یا محتوای لاستیک در این شکل مشاهده شده است. با وجود این روند، مخلوط با لاستیک ۵٪ رفتار متفاوت داشته و افزایش مقاومت را نشان می دهد. همچنین، همانطور که انتظار می رود، درجه بندی شماره PCA نتایج بهتری را ارائه می دهد. RAP و لاستیک مقاومت خمشی مخلوط های RCCP را به طور معناداری کاهش می دهد. لازم به ذکر است که افزایش اندک و ناچیز در حدود ۳ تا ۴٪ در نمونه های حاوی ۵٪ لاستیک خرد مشاهده شد. استفاده از RAP منجر به مقاومت فشاری ضعیف در نمونه های RCCP، به ویژه هنگامی که محتوای RAP بالاتر از ۵۰٪ باشد. با این وجود، استفاده از لاستیک نتایج بهتری را نشان داد و اندکی افزایش مقاومت فشاری در حدود ۵٪ در محتوی ۵٪ لاستیک بدست آمد. بنابراین باید در استفاده از RAP در روسازی های RCCP توجه زیادی شود تا حداقل مشخصات لازم برای روسازی های بتنی حفظ شود. با توجه به اینکه افزودن ۵ درصد خرد لاستیک می تواند باعث بهبود رفتار بتن در همه ابعاد شود، استفاده از لاستیک باید به عنوان کالای مفید گزارش شود. با این حال، استفاده از محتویات RAP یا لاستیک خرد شده به ترتیب تا ۵۰٪ و ۱۰٪، می تواند قابل قبول باشد و مخلوط های حاوی مطالب بیشتر توصیه نمی شوند [۴۴].

دیوید دودو-آرین و همکاران لاستیک های بازیافت شده را به بتن اعمال کردند ، که در اسلامپ و کارآیی و مقاومت فشاری بتن آماده شده ، افت قابل توجهی مشاهده شد. با این وجود، دارای چند ویژگی مطلوب مانند چگالی کمتر، مقاومت بیشتر در برابر ضربه و چقرمگی، افزایش شکل پذیری و افزایش اندک استحکام خمشی در بتن های با مقاومت پایین تر بود مشاهده شد [۴۹].

در مطالعه دیگر که توسط محمد و آدامو انجام شد، لاستیک فشرده غلتکی (RCR) با جابجایی ریزدانه با خرده لاستیک (CR) در روسازی بتن غلتکی (RCCP) برای بهبود مقاومت خمشی، انعطاف پذیری آن و کاهش اثرات محیطی لاستیک های زباله توسعه داده شد. با توجه به اینکه لاستیک خرد شده باعث کاهش مقاومت در بتن می شود، افزودن نانو سیلیس NS برای کاهش اتلاف مقاومت RCR یک راه حل ممکن است. شانزده مخلوط در چهار سطح (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) لاستیک حجمی جایگزین ریزدانه شدند و چهار سطح (۰٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪) وزنی جایگزین سیمان تهیه و آزمایش شدند. خواص سخت شده شامل وزن واحد، مقاومت فشاری، خمشی و کششی، مدول الاستیک، مقاومت در برابر سایش و جذب آب مورد بررسی قرار گرفته است. یافته ها نشان می دهد که CR کارایی بتن غلتکی را افزایش می دهد. مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش بتن غلتکی با ۱۰٪ CR افزایش می یابد و استحکام خمشی نیز با جایگزینی تا ۲۰٪ مصالح ریز با CR افزایش می یابد. نتایج بهینه سازی نشان داد که می توان مخلوط بهینه را با جایگزینی ۱۰٪ حجم ریزدانه و افزودن ۱/۱۳٪ NS با وزن مواد سیمانی به دست آورد تا از RCR با استحکام، دوام و انعطاف پذیری بالا برای مصارف روسازی استفاده شود. لاستیک خرد شده مقاومت فشاری را کاهش می دهد ، به عنوان مثال ، مخلوط های R20-0 و R30-0 به ترتیب نسبت به R0-0 به ترتیب ۱۶/۳٪ و ۲۳/۲٪ کاهش می یابد. مقاومت فشاری RCR با افزودن NS به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مقاومت فشاری با افزودن ۱٪ و ۲٪ NS به طور قابل توجهی افزایش می یابد و با ۳٪ افزودن NS کاهش می یابد. به عنوان مثال، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط های R10-1 و R10-2 به ترتیب ۲۵٪ و ۱۱/۵٪ افزایش می یابد، در حالی که R10-3 در مقایسه با R0-0 حدودا ۱۶/۷٪ کاهش می یابد. استحکام کششی تقسیم شده ۲۸ روزه مخلوط R10-0 در حدود ۱۸/۷٪ افزایش می یابد در حالی که R20-0 و R30-0 به ترتیب ۱۵٪ و ۲۹/۴٪ در مقایسه با مخلوط کنترل R0-0 کاهش می یابد. علاوه بر این از NS با موفقیت کاهش افت استحکام کششی تقسیم شده در RCR را کاهش داده است. مقدار NS از ۱٪ به ۳٪ مقاومت کششی تقسیم شده را افزایش می دهد و با ۱٪ NS به عنوان مقدار مطلوب برای ۰٪، ۱۰٪ و ۳۰٪ CR بدست می آید. به عنوان مثال ، مقاومت کششی تقسیم شده مخلوط R30-1 و R30-2 به ترتیب با ۲۱/۴ درصد و ۱۸/۷۵ درصد نسبت به

R30-0 افزایش می یابد. استحکام خمشی ۲۸ روزه مخلوط های R10-0 و R20-0 و R30-0 به ترتیب با ۳/۳۹٪ و ۳/۹٪ در مقایسه با مخلوط کنترلی R0-0 افزایش یافته است. افزودن NS به RCR مقاومت خمشی آن را افزایش می دهد. درصد مطلوب NS برای کل محتوای CR ۱٪ بود. استحکام خمشی ۲۸ روزه R10-1، R20-1 و R30-1 به ترتیب نسبت به R10-0، R20-0 و R30-0 به ترتیب ۴/۷۱٪، ۶/۰۷٪ و ۳/۹٪ افزایش می یابد. RCR با داشتن آب کم، منجر به کاهش هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی می شود و همچنین باعث تجمع ذرات نانو و کارایی ضعیف می شود و در نتیجه مقاومت خمشی RCR را کاهش می دهد. مقاومت فشاری و استحکام کششی تقسیم RCR با جایگزینی سنگدانه ریز با CR بالاتر از ۱۰٪ کاهش می یابد، در حالی که مقاومت خمشی تا ۲۰٪ محتوای CR افزایش می یابد. افزودن تا ۲٪ NS باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی RCR در تمام سنین می شود. با ۱٪ NS مقدار بهینه بدست می آید و در جلوگیری از افت مقاومت کششی و فشاری در ۲۸ روز تا ۲۰٪ CR موفق است. با این حال NS بالاتر از ۲٪ تأثیر منفی بر مقاومت نشان می دهد. نتایج حاصل از فرآیند بهینه سازی با استفاده از RSM نشان می دهد که ترکیب ۱۰٪ CR به عنوان جایگزینی ریزدانه بصورت حجمی و افزودن ۱/۱۳٪ NS از وزن سیمان، بهترین مقاومت فشاری، استحکام خمشی استحکام کششی تقطیر و جذب آب را به همراه خواهد داشت [۵۰].

در تحقیق انجام شده توسط فخری و صابری در مورد استفاده از لاستیکهای بازیافتی تایرها در روکش بتن غلتکی با هدف بهبود عملکرد آن و کاهش اثرات محیطی بحث شده است. تمرکز اصلی بر خصوصیات اساسی بتن غلتکی، از جمله وزن واحد، مقاومت فشاری، استحکام خمشی، و جذب آب نمونه ها بود. بنابراین، ذرات لاستیک های استفاده شده به عنوان جایگزینی برای ماسه با درصد های ۰، ۵، ۱۰... و تا ۳۵٪ استفاده شد. همچنین از افزودنی های دوده سیلیس به عنوان جایگزینی برای سیمان در هشت مخلوط استفاده شد. بتن لاستیکی با جایگزینی ذرات لاستیکی به جای ماسه از ۵٪ تا ۳۵٪ تهیه شد. همچنین در هشت مخلوط از دود سیلیس استفاده شد به طوری که به عنوان ۱۰٪ حجم سیمان جایگزین شد. به منظور تهیه مخلوط بتونی، سنگدانه خشک که شامل شن، ماسه و ذرات لاستیک است به خوبی مخلوط شد، سپس به تدریج آب و سیمان به میکسر اضافه شدند. مقاومت فشاری نمونه ها با دود سیلیکا از جمله C5RS10، C10RS10، C15RS10 و C20RS10 در مقایسه با نمونه CS10 در سن ۲۸ روز حدود ۴٪، ۱۷٪، ۱۳٪ و ۲٪ افزایش یافته است. در کل، استفاده از دود سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه ها شد، به عنوان مثال پیشرفتی در حدود ۳۷٪ برای C10RS10 در مقابل C10R مشاهده شد. نتایج استحکام خمشی را به ترتیب پس از ۷ روز و ۲۸ روز از پختن ارائه می دهد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت خمشی نمونه C5R، بدون دود سیلیس، در مقایسه با نمونه C حدود ۹٪ افزایش یافته است.

همچنین مقاومت خمشی نمونه C5RS10 با دود سیلیس در مقایسه با نمونه CS10 حدود ۸٪ افزایش یافته است. علاوه بر این، استفاده از دود سیلیس مقاومت خمشی نمونه ها را به طرز چشمگیری بهبود بخشید، برای شفاف سازی بیشتر، پیشرفتی در حدود ۱۹٪ برای C10RS10 در مقابل C10R مشاهده شد. نتایج حاصل از این مطالعه افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای ۵٪ و ۱۰٪ نمونه ها بدون دود سیلیس و ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ با دود سیلیس را نشان داد. با این حال، مقاومت فشاری برای نمونه های دیگر در مقایسه با نمونه کنترل کاهش یافته است. به ترتیب، افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه در ۵٪ نمونه ها با و بدون دود سیلیس وجود دارد، اگرچه استحکام خمشی برای سایر مخلوط ها کاهش یافته است [۴۳].

۲-۱۱ پژوهش های انجام شده با استفاده از آسفالت بازیافتی (RAP) در روسازی بتن غلتکی :

در ایران، آسفالت بازیافت شده RAP تا حدی برای روسازی قیری مورد استفاده قرار می گیرد، اما بخش باقیمانده آن مورد استفاده قرار نمی گیرد و به مناطق متروکه فرستاده می شود و این منجر به ایجاد مشکلات زیست محیطی می شود. علاوه بر این، RAP و لاستیک دارای انعطاف پذیری کمی بالاتر از سنگدانه ها هستند که می توانند هنگام استفاده از آن ها به عنوان مواد زائد، بر خاصیت ترکیبی مخلوط تأثیر بگذارند. با این حال، این ضایعات دارای عوارض جانبی هستند که احتمالاً با استفاده از مواد افزودنی حل می شوند. انتشار ترک و شاخص چقرمگی از عواملی اساسی هستند که با استفاده از این زباله ها قابل بهبود هستند. اگرچه رفتار استحکام مخلوط با اضافه کردن مواد زائد به طور معکوس تحت تأثیر قرار می گیرد، اما خواص دیگر مانند چقرمگی و انتشار مسیر ترک را بهبود می بخشد. خرده آسفالت بازیافت شده RAP مواد زایدی هستند که مطمئناً اثرات نامطلوب قابل توجهی بر محیط اطراف دارند. یکی از کاربردهایی که مورد توجه محققان قرار گرفته است استفاده از این مواد در مخلوط های سیمانی از جمله تولید بتن است. این در حالیست که به طور مداوم مقدار زیادی از قطعات آسفالت در تعمیر و نگهداری جاده ها تولید می شود. بنابراین مطلوب است که در مخلوط های معمولی مورد استفاده در روسازی ها مورد استفاده قرار گیرد. با بررسی اسناد و مدارک و انجام آزمایشات متعدد، مشخص شد که بتن غلتکی ساخته شده از آسفالت بازیافتی می تواند به عنوان یک آسفالت مناسب برای ترافیک کم و جاده های روستایی و همچنین برای پوشش نهایی طیف گسترده ای از روسازی ها استفاده شود.

مدرس و حسینی خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی خاکستر پوسته برنج را با مصالح روسازی بازیافتی و مصالح خوب بررسی کردند. آنها دریافتند که استفاده از هر دو ریزدانه و درشت دانه بازیافتی RAP مقاومت فشاری RCC را کاهش می دهد. با این حال، جایگزین درشت دانه منجر به افزایش مقاومت فشاری نسبت به ریزدانه RAP شد. آنها همچنین دریافتند که با توجه به ماهیت مترقی واکنش پوزولانی، مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و انعطاف پذیری ترکیبات RCC با افزایش زمان بهبود می یابد [۵۱].

در مطالعه ای که توسط بوستا و همکاران^{۱۳} اثرات جایگزینی مصالح طبیعی توسط RAP بر روی خصوصیات مکانیکی RCC مدول الاستیسیته، استحکام کششی و مقاومت فشاری به صورت تجربی آزمایش شدند. نتایج آزمایشات مکانیکی انجام شده بر روی شش مخلوط RCC طراحی شده نشان داد که با افزایش محتوای RAP خواص RCC کاهش می یابد. پنج مخلوط RCC با ترکیب ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰٪ RAP، به عنوان جایگزینی از مصالح درشت و ریز (جایگزینی بر اساس حجم)، با برچسب F20، F30، F40، F60 و F100، به ترتیب، فرموله شدند. وزن واحد مخلوط تازه F0 بدون RAP در مقایسه با F100 با ۱۰۰٪ RAP حدود ۱۲٪ کاهش یافته است. این کاهش به دلیل وزن واحد کم مصالح RAP در مقایسه با NA است. با افزایش محتوای RAP، تمام خصوصیات مکانیکی کاهش یافته است. به عنوان مثال، در ۲۸ روز، هنگام مقایسه مخلوط های F0 با F100، مقاومت فشاری حدود ۷۰٪ کاهش یافته است. برای استحکام کششی غیرمستقیم، کاهش بین این دو مخلوط کمتر برجسته است (حدود ۴۰٪). با این وجود، خواص برای کاربرد روسازی با تعویض RAP تا ۶۰٪ قابل قبول باقی مانده است. زیرا مقاومت فشاری بالای ۲۰ مگاپاسکال باقی مانده است، و استحکام کششی غیرمستقیم بالاتر از ۱/۶ مگاپاسکال برای روسازی کلاس ۲ مطابق استاندارد NF P 98-170 می باشد [۵۲].

خواص مکانیکی و دوام RCC با مواد RAP با بتن غلتکی ۱۰۰٪ NA در مطالعه ستاری، دبیب و کدري^{۱۴} مقایسه شدند. نتایج تجربی نشان داد که تولید RCC با حداکثر ۵۰٪ مواد RAP امکان پذیر است. ۵ طرح اختلاط با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد RAP بعنوان ریزدانه و درشت دانه و بصورت جدا جدا در نظر گرفته شد. به طور مقایسه ای با بتن مرجع RCC 0/0 به وضوح می توان خاطر نشان کرد که افزایش محتوای مواد RAP بر مقادیر مقاومت اثر منفی می گذارد. در سن ۲۰ روزگی، کاهش مقاومت فشاری ۴۸٪ برای RCC با ۱۰۰٪ مواد RAP بود، که با نتایج سایر محققان مطابقت دارد. در صورت جایگزینی ۱۰۰٪ با ماسه های طبیعی ریزدانه کاهش در حدود ۳۲٪ بوده و در صورت استفاده ۱۰۰٪ از مواد RAP درشت دانه، تا حدود ۵۵٪ می رسد. در ۲۰ روز، مقاومت کششی RCC با مواد RAP از ۱/۶ مگاپاسکال تجاوز نمی کند و در طولانی مدت (۹۰ روز) نسبت به بتن مرجع مقایسه شد. همانطور که مشاهده شد و به طور مشابه از مقاومت فشاری، مقاومت کششی RCC با ۱۰۰٪ مواد RAP در مقایسه با بتن مرجع آنها حدود ۲۶٪ کاهش می یابد. مواد RAP با NA متفاوت است زیرا مقداری قیر به ذرات متصل شده و تراکم کمتری و ظرفیت بیشتری برای جذب آب ایجاد می کند. تراکم و چگالی RCC با مواد RAP به شدت تحت تأثیر میزان مواد RAP است. استفاده از مواد RAP ریز، درشت یا هر دو ریز و درشت باعث کاهش مقاومت فشاری RCC می شود. با این حال، جایگزینی ۵۰٪ از قسمت ریز و درشت منجر به مقاومت

^{۱۳} Buseta et al

^{۱۴} Settari, debib, kedri

کششی بالاتر می شود. خواص مکانیکی و جذب آب RCC به میزان زیادی از قیر متصل به ذرات RAP تأثیر دارد و نسبت به تخلخل ناشی از آن بسیار حساس است. بازیافت و ارزش گذاری مواد RAP در RCC ممکن است به از بین بردن مقادیر زباله کمک کند و در عین حال نیازهای سنگدانه های طبیعی را کاهش دهد [۵۳].

در پژوهشی که توسط دبارما و همکاران^{۱۵} ایجاد شد، تلاش برای افزایش پتانسیل مخلوط RCCP حاوی ۵۰٪ RAP (۵۰ درصد جایگزین ریزدانه و ۵۰ درصد جایگزین درشت دانه) شد. ۵۰ درصد جایگزینی RAP با مصالح دانه ای حدود ۲۱ درصد مقاومت فشاری و حدود ۳۴ درصد مقاومت کششی را کاهش می دهند. بتن حاوی RAP با ضایعات مختلف صنعتی و کشاورزی مانند سیلیس دود، خاکستر بادی و خاکستر نیشکر به عنوان جایگزینی جزئی سیمان معمولی ساخته شد. مشاهده شد که گنجاندن ترکیبات افزوده شده تأثیر ناچیزی بر چگالی مخلوط RCCP تازه دارد، با این حال، میزان رطوبت را به میزان قابل توجهی افزایش داد. نتایج به وضوح پتانسیل دود سیلیس را برای مخلوط RCCP RAP نشان می دهد، زیرا نه تنها خصوصیات فیزیکی و مکانیکی را افزایش می دهد، بلکه باعث بهبود دوام مخلوط های RCCP بطور قابل توجهی می شود. همچنین، استفاده از دود سیلیس در بین همه زباله ها مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست بود. هزینه های ساخت اولیه و انتشار CO₂ تا ۸/۴٪ و ۹/۷٪ کاهش یافته است. در مورد سایر پسماندهای صنعتی، ۱۵٪ خاکستر بادی نیز می تواند برای تولید مخلوط پایدار RCCP مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که دوز بالاتر خاکستر (۳۰٪) و خاکستر نیشکر (۱۰ و ۱۵٪) ممکن است به عنوان لایه اساس استفاده شوند. در اثر جایگزینی مصالح با ۵۰ درصد RAP درصد رطوبت بهینه ۱۲ درصد افزایش می یابد که علت می تواند بدلیل حضور و تجمع لایه آلاینده و غبار در اطراف مصالح RAP بوده که تقاضای آب بیشتری داشته اند. تلاش شد با استفاده از چند پسماند صنعتی و کشاورزی مانند فوم سیلیس SF خاکستر FA و خاکستر نیشکر (SA) به منظور تقویت آن، این امر تقویت شود، اما تأثیر چندانی بر خواص تازه آنها نداشت و نه بطور قابل توجهی کاهش یافته است. بیشترین تراکم خشک MDD کاهش یافته و محتوای رطوبت بهینه OMC افزایش یافته است، تأثیر بر خواص مقاومت، به جز SF، ورود مواد زاید در نظر گرفته شده باعث کاهش خواص مقاومت مانند مقاومت فشاری، مدول پارگی و مقاومت کششی تقسیم شده از ترکیب ۵۰٪ RAP شد [۵۴].

مطالعه رانسینچانگ و دبارما^{۱۶} مقدار بهینه سازی RAP درشت، ریز و کل به همراه نسبت بهینه آن (۵۰٪ و ۱۰۰٪) برای مخلوط بتنی RCCP براساس ویژگی های مختلف تازه، مکانیکی و دوام است. خواص در نظر گرفته

^{۱۵} Debbarma et al

^{۱۶} Ransinchang,debbarma

شده، رطوبت بهینه، چگالی تازه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، استحکام کششی تقسیم، حفره های قابل نفوذ، جذب آب، میزان جذب اولیه و ثانویه و خاصیت دوام در محیط های پرخاشگر یون های سولفات و کلرید بود. ترکیب هر ذره از RAP باعث کاهش خاصیت ترکیبات RCCP شده و در مقایسه با مخلوط کنترلی، کمتر از ۴٪ اثرات مضر بر مقادیر چگالی خشک داشت. مقاومت فشاری مورد نیاز ۲۷/۶ مگاپاسکال برای مخلوط های RCCP توسط تمام مخلوط های RAP به دست آمد، به جز مخلوط حاوی ۱۰۰٪ RAP، با این وجود، با همان مخلوط به حداقل معیار مقاومت خمشی ۳/۶۷ مگاپاسکال رسید. علاوه بر این، ظرفیت باربری پس از شکست از مخلوط های RAP بالا بهتر از مخلوط RAP کم و مخلوط کنترلی RCCP بود. نتایج دوام نشان داد که ترکیب RAP برای مخلوط RCCP می تواند از نظر تخریب کمتر، کاهش جذب آب، نرخ اولیه و ثانویه پایین تر جذب آب مفید باشد، با این حال، مخلوط ها هنگامی که در معرض محیط های تهاجمی سولفات و کلرید قرار گرفتند، تلفات چشمگیری را متحمل شدند. با این وجود، نسبت های کم RAP (درشت و ریز، به طور جداگانه) ممکن است برای این محیط ها پیشنهاد شود. نتایج مقاومت فشاری مخلوط های RCCP سخت شده RAP در ۷، ۲۸ و ۹۱ روز از سن پخت بررسی شده است. مخلوط RAP ریز عملکرد بهتری از مخلوط درشت RAP-RCCP دارد. برای نمونه، درصد کاهش برای ترکیبات RF50 و RF100 نسبت به مخلوط ارجاع در ۲۸ روز به ترتیب ۹ و ۱۴ درصد بود، در حالی که، مخلوط های RC50 و RC100، کاهش مقاومت چشمگیری از ۲۴ و ۳۳ درصد در همان سن ابتدایی نشان دادند. به طور کلی، مخلوط های فراگیر RAP ریز گزارش شده است که از مقاومت فشاری کمتری نسبت به مخلوط های بتن فراگیر RAP درشت برخوردار هستند، علاوه بر این، محتوای آسفالت موجود در RAP ریز حدود ۴/۵ درصد که در مقایسه با ادبیات گزارش شده مقدار آسفالت (۷٪) بوده است [۵۵].

هوانگ و ستاری و همکاران^{۱۷} یافته های مشابهی را نشان دادند که مخلوط های RAP ریز می توانند عملکرد بهتری نسبت به مخلوط های RAP درشت داشته باشند. افزودن RAP در مخلوط های بتنی و آزمایش نمونه ها در روزهای اولیه نمی تواند تأثیر منفی RAP را نشان دهد. از طرف دیگر، در ۲۸ روزگی، ملات به استحکام کافی می رسد و برای مخلوط های فراگیر RAP، نارسایی انسجام آسفالت در روزهای بعدی مشاهده می شود، و بنابراین اثر منفی واقعی از اجزاء سنگدانه های پوشیده از آسفالت در مخلوط های بتنی را نشان می دهد. به همین منظور اکثر محققان توصیه می کنند استحکام ۲۸ روزه را برای هدف طراحی مخلوط های بتنی در نظر بگیرند. در سن ۲۸ روزگی، تمام مخلوط های RAP به جز RC100 و RAP100 حداقل مقاومت لازم را به ۲۷/۶ مگاپاسکال بدست آوردند. پیشنهاد شده است که ۵۰٪ از RAP درشت و هر نسبت RAP ریز می تواند برای ساخت روسازی

^{۱۷} Huang, settari

های RCCP که در روزهای طولانی تر مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده شود. نتایج استحکام خمشی مخلوط RCCP در نظر گرفته شده در روزهای مختلف بررسی شده است. برخلاف نتایج مقاومت فشاری، مخلوط های درشت RAP (RC) کمی بهتر از مخلوط RAP ریز (RF) از نظر مقاومت خمشی انجام می شوند و همچنین، مقاومت خمشی به مراتب بهتری نسبت به مخلوط های RAP ترکیبی نشان می دهند. برای نمونه، مقاومت خمشی RC50 و RC100 برابر ۴/۷ مگاپاسکال و ۴/۴ مگاپاسکال بود که حدود ۱۰٪ و ۳٪ و همچنین حدود ۲۴٪ و ۱۹٪ بالاتر از RF50 و RF100 و RAP50 و RAP100 به ترتیب در ۲۸ روزگی بدست آمده است. با این وجود، لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، تمام مخلوط های RAP شامل RCCP به حداقل معیار استحکام خمشی ۳/۶۷ مگاپاسکال در ۲۸ روز سن پخت (هم از نظر تجربی و هم از نظر آماری) برای سازه های روسازی های RCC، دست یافتند. با توجه به موارد ذکر شده، استفاده از ۵۰٪ از RAP درشت و ترکیبی ریز (حاوی لایه ای از آلاینده های گرد و غبار در نتیجه احیای کامل عمق) برای تولید روکش های بتن غلتکی می تواند پیشنهاد شود. تمام مخلوط های RAP در نظر گرفته شده (به جز مخلوط RAP100) حداقل نیاز به مقاومت فشاری را بدست آوردند، با این حال، همان مخلوط یعنی مخلوط RAP100 حداقل معیار مقاومت خمشی ۳/۶۷ مگاپاسکال را بدست آورد، پیشنهاد می شود تا از هر پتانسیلی (بصورت جداگانه / ترکیبی) از RAP را برای استفاده در روسازی های RCC استفاده شود. علاوه بر این، رفتار پس از تست از نمونه های RAP نشان داد که اجزاء RAP می تواند باعث افزایش چقرمگی و در نتیجه افزایش ظرفیت حمل بار پس از خرابی آسفالت ها شود. استفاده از مصالح RAP برای تولید آسفالت بتنی غلتکی می تواند به طور چشمگیر کل هزینه تولید ۱ مترمکعب بتن غلتکی را به میزان ۴۶٪ کاهش دهد، و این نشان از قابلیت مناسب بودن آن به عنوان جایگزینی برای تهیه مخلوط های RCCP و در نتیجه تحقق مطالبات مهم است [۵۶].

نتایج زیر نیز با مقایسه استفاده از بتن غلتکی و روسازی آسفالتی به عنوان یک لایه در روسازی در تحقیق دیوانداری و همکاران انجام شد. مقاومت خمشی در روسازی های بتن غلتکی ۲۵٪ بیشتر از روکشهای آسفالتی با لایه تثبیت شده سیمان در کارخانه است. مقاومت بتن غلتکی در برابر سایش بیشتر است. بتن غلتکی مقاومت بیشتری در برابر روغن های ریخته شده و مواد چرب موجود در سطح جاده دارد. در مقاله حاضر، مطابق با مطالعات قبلی، ویژگی ها و ویژگی های بتن غلتکی به عنوان یکی از لایه های روسازی راه ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. پنج مخلوط ساخته شده هر کدام دارای شن و ماسه طبیعی هستند که تا ۵۰٪ و ۱۰۰٪ با مواد آسفالت بازیافت شده جایگزین شدند. در مقایسه با بتن مرجع RCC 0/0، به وضوح می توان اظهار داشت که افزایش محتوای RAP اثر منفی بر حجم مقاومت فشاری دارد. با افزایش محتوای ماده RAP خصوصیات مکانیکی

بتن غلتکی کاهش می یابد. اگر ۱۰۰٪ ماسه های طبیعی جایگزین ۱۰۰٪ مواد ریز RAP شوند، مقاومت فشاری حدود ۳۰٪ کاهش می یابد. در صورت استفاده ۱۰۰٪ از مواد RAP، کاهش در حدود ۵۰٪ خواهد بود. اگر ۵۰٪ از RAP های درشت و ریزدانه استفاده شود، حرکت مواد درشت و ریز RAP باید با احتیاط انجام شود، زیرا این امر بر مقاومت فشاری تأثیر منفی می گذارد. جایگزینی ماسه طبیعی و مواد ریز RAP ضریب کشش را به طور قابل توجهی حدود ۴۱ درصد کاهش می دهد. هنگامی که ۱۰٪ از مواد طبیعی درشت جایگزین شده توسط مواد آسفالت بازیافت شده، این کاهش به ۵۳٪ می رسد. برخلاف آنچه تصور می شد، مقدار قیر رسیده به ذرات RAP ضریب کشش بتن جدید را در طی ۲۸ روز تقویت نکرد. بنابراین، جایگزینی سنگدانه های طبیعی با این نوع دانه های بازیافتی باید با احتیاط انجام شود و برای دانه های ریز و درشت نیز ۵۰٪ محدود شود [۵۷].

اشتات و همکاران^{۱۸} تحقیقی با هدف ارزیابی پتانسیل استفاده از مصالح بازیافتی آسفالت RAP و مصالح بازیافتی بتن RCA و بخار سیلیس SF در تولید بتن فشرده غلتکی RCC انجام شد. سی مخلوط RCC ساخته شد که در آن سنگدانه های طبیعی کاملاً با RAP و RCA با درصدهای (۹۰٪ و ۱۰٪)، (۸۰٪ و ۲۰٪)، (۷۰٪ و ۳۰٪)، (۶۰٪ و ۴۰٪)، (۵۰٪ و ۵۰٪)، (۴۰٪ و ۶۰٪)، (۳۰٪ و ۷۰٪)، (۲۰٪ و ۸۰٪) و (۱۰٪ و ۹۰٪) و سیمان تا حدی حدود (۲٪) با بخار سیلیس جایگزین شد. خواص مکانیکی و فیزیکی مخلوط های RCC شامل استحکام فشاری، استحکام کششی، ضریب الاستیسیته، مدول پارگی و چگالی ارزیابی شد. ویژگی دوام از طریق جذب آب RCC کنترل شد. نتایج آزمایش نشان داد که جایگزینی نسبی سیمان با ۲/۵٪ و ۵٪ SF باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش چگالی خشک مخلوط های RCC شده است. جایگزینی سنگدانه های NA با RCA و RAP در مخلوط های RCC باعث کاهش خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته شده است. در نهایت، با افزایش محتوای RCA جذب آب افزایش یافت که مهمترین شاخص برای دوام مواد است، در حالی که با افزایش محتوای RAP جذب آب را کاهش یافته است [۵۸].

ختاک و همکاران ویژگی های مکانیکی و ریزساختاری بتن متراکم غلتکی تولید شده از روکش آسفالت بازیافتی RAP و چسب سیمان ژئوپلیمری GPC مورد ارزیابی قرار گرفته و با مخلوط های تولید شده از سیمان معمولی پرتلند OPC مقایسه شده است. مشخص شد که RCC با استفاده از چسبند ژئوپلیمر مقاومت فشاری مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی بالاتری را در مقایسه با مخلوط حاوی سیمان پرتلند معمولی نشان می دهد. همچنین مشخص شد که خواص مکانیکی بتن توسعه یافته به اجزای مخلوط بستگی دارد. نتایج تجربی نشان داد که RCC با استفاده از چسبند ژئوپلیمر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی را به ترتیب در

^{۱۸} Ashtiat et al

محدوده ۲۱/۱-۸/۴ مگاپاسکال ، ۳۵-۱۸/۳ گیگاپاسکال و ۴/۱-۲/۹ مگاپاسکال نتیجه می دهد. تجزیه و تحلیل رگرسیون نیز برای ایجاد ارتباط بین ویژگی های مکانیکی و ترکیبات مختلف مخلوط انجام شد. بر اساس ویژگیهای مکانیکی ، بتن غلتکی حاوی RAP با چسب پلیمری می تواند به عنوان روسازی قوی برای روسازی در سیستم روسازی کامپوزیتی یا پوشیدن مسیرهای کم حجم استفاده شود[۵۹].

پژوهش احمدی و همکاران به بررسی خواص مکانیکی بتن فشرده غلتکی شامل روسازی آسفالت بازیابی شده RAP می پردازد. به این پژوهش ۲۷۶ نمونه استوانه ای RCC با سایزهای مختلف RAP (یعنی ریز ، درشت و مخلوط) در نسبت های مختلف (یعنی ۱۰ ، ۲۰ ، و ۴۰ درصد) تهیه شد. نتایج نشان می دهد که ترکیب RAP مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیر مستقیم را کاهش می دهد. برای هر سایز RAP ، از یک مدل رگرسیون برای به حداکثر رساندن محتوای RAP استفاده شد. در حالی که حداقل مقدار برآورده شده توسط ACI در ساخت روسازی بتن غلتکی ۲۷/۶ مگاپاسکال می باشد. نتایج همچنین نشان می دهد که مقدار RAP بیشتر ، انعطاف پذیری بیشتری در RCC ایجاد می کند. این مسئله همچنین با نتایج آزمون مدول الاستیسیته ثابت شد. علاوه بر این ، شاخص سختی نشان می دهد که افزایش محتوای RAP منجر به افزایش ۴۳ درصدی ظرفیت جذب انرژی RCC می شود[۶۰].

در مطالعه رضایی و همکاران، در مجموع چهار مخلوط متفاوت با جایگزینی بخشی از سنگدانه های طبیعی با روکش آسفالت بازیافتی RAP در نسبت های مختلف تهیه شد. نتایج نشان داد که افزودن RAP به مخلوط باعث کاهش مقاومت مکانیکی مخلوط بتن فشرده غلتکی RCC می شود. بهترین استحکام مکانیکی با ۵۰٪ جایگزینی RAP بدست آمد. برای افزایش مقاومت مکانیکی RCC ساخته شده با ۵۰٪ RAP ، از میکروسیلیس با جایگزینی نسبت به سیمان در درصدهای ۳٪ ، ۶٪ ، ۹٪ و ۱۲٪ استفاده شد. افزایش محتوای میکروسیلیس از ۳ به ۱۲ باعث افزایش مقاومت مکانیکی همه مخلوط ها شد. نتایج نشان داد که RCC با ۵۰٪ RAP و ۹٪ میکروسیلیس حدود ۲۰٪ مقاومت فشاری بیشتری دارد. همچنین افزایش در مقاومت کششی و مقاومت خمشی به ترتیب ۶ و ۲ درصد بود[۶۱].

دببارما و رانسینچانگ به مرور جدید بر استفاده از سنگدانه های روسازی آسفالت RAP بازیابی شده در مخلوط های روسازی بتنی فشرده غلتکی RCCP پرداخته است. به دلیل مقرون به صرفه بودن و ویژگی سریع ساخت RCCP ، به نظر می رسد استفاده از RAP در این فناوری روسازی بهترین گزینه بعدی باشد. در این مقاله، عوامل موثر بر خواص تازه و سخت شده مخلوط RCCP به دلیل ترکیب RAP مورد بحث قرار گرفت. بر اساس این بررسی ، مشاهده شد که نوع و سن RAP ، غلظت آسفالت و ذرات تجمع یافته ، دانه بندی RAP و سطح های جایگزینی RAP می تواند به طور قابل توجهی بر قدرت و دوام مخلوط های RCCP تأثیر بگذارد. از دیدگاه

پایدار، اکثر محققان توصیه می کنند که تا ۵۰٪ از RAP را می توان برای جایگزینی تا حدی سنگدانه های طبیعی در مخلوط های RCCP استفاده کرد. به طور خلاصه ، استفاده از RAP در مخلوط های RCCP نه تنها منافع اقتصادی را به همراه خواهد داشت بلکه به ترتیب به مزایای زیست محیطی مانند کاهش ذخایر RAP و ردپای کربن نیز کمک می کند [۶۲].

۲-۱۲ پژوهش های انجام شده با استفاده از سرباره (SLAG) در روسازی بتن غلتکی :

سرباره فولادی در شاخه های مختلف مهندسی عمران شامل آسفالت بتنی، مخلوط قیر و ملات و غیره قابل استفاده است. برای روسازی بتنی تحقیقات مختلفی برای ارزیابی احتمال استفاده از سرباره فولادی به عنوان مصالح انجام شده است. با توجه به ادبیات، دو روش برای جایگزینی بخشی از سنگدانه های طبیعی در بتن با سرباره وجود دارد که شامل سنگدانه های درشت و ریز می باشد. زبری و تخلخل سنگدانه ای که در مخلوط های بتنی مورد استفاده قرار می گیرد می تواند نقش مهمی در کارایی بتن داشته باشد. سرباره ها همواره یکی از مشکلات کارخانجات فولاد سازی بوده است که باید برای دپوی آن فضای وسیعی را در نظر داشت. تخصیص این فضا می تواند هزینه های مالی سنگینی را برای این کارخانه ها به همراه داشته باشد. در چنین شرایطی که وجود سرباره ها در این کارخانه ها مضر محسوب می شود و نبود سنگدانه ها در بسیاری از مناطق یا کشورهای دیگر، پروژه های عمرانی را دچار مشکل می سازد و هزینه های ساخت را در این مناطق افزایش می دهد. در صورتی که بتوان از سرباره ها به عنوان سنگدانه در پروژه های عمرانی استفاده نمود می توان مشکلات کارخانجات فولادسازی و نبود مصالح سنگی برای این مناطق را به طور همزمان برطرف نمود و همچنین منابع طبیعی سنگی که تجدید ناپذیر می باشند را نیز حفظ نمود که از دیدگاه زیست محیطی اهمیت بسزایی دارد. هزینه اجرای روسازی در پروژه های راهسازی تقریباً ۳۰ درصد کل پروژه است.

مطابق گزارش منتشر شده توسط اداره راه فدرال امریکا با موضوع استفاده از سرباره آهن گدازی سردشده بعنوان درشت دانه در روسازی بتنی، خواص سرباره به سرعت سرد شدن آن بستگی دارد. سرباره هایی که به آهستگی سرد می شوند دارای تخلخل کمتری هستند که موجب افزایش چگالی آنها می شود. سرد شدن آهسته همچنین باعث تشکیل فازهای کریستالی می شود که باعث پایداری شیمیایی آن ها می شود. هر چه سرباره چگالتر و کریستالیزه تر باشد مطلوبتر است. جذب آب سرباره نسبت به سنگدانه های طبیعی بیشتر است بگونه ای که با کیفیت ترین سرباره های کوره آهن گدازی دارای جذب آب کمتر از ۴٪ می باشد. مطابق گزارش های موجود، استفاده از سنگدانه های سرباره ای در بتن به صورت SSD باعث افت کارپذیری بتن تازه و افزایش جمع شدگی و ترک خوردگی زود هنگام تصادفی در روسازی های ساخته شده می گردد. همچنین باعث آسیب ریزساختار بتن بدلیل خشک شدگی موضعی خمیر سیمان در مجاورت دانه های سرباره می گردد. در بتن سخت شده، مهمترین

خاصیت مکانیکی روسازی بتنی، مشخصات سطح ترک تشکیل شده در درزهای کنترل است. سطح ترک در بتن شامل سنگدانه سرباره ای نسبتاً صاف است و ترک از میان آن عبور میکند نه از اطراف سنگدانه ها. سطح صاف ترک باعث می شود تا سنگدانه ها تا حدودی دارای قفل و بست بین دانه ای باشند.[۶۳]

در تحقیقی که لام و هکاران^{۱۹} انجام دادند، امکان استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی EAF و خاکستربادی را در بتن غلتکی RCCP بررسی شده است. پس از فرایند تولید و مراقبت، سرباره EAF ناشی از واکنشهای هیدراتاسیون و واکنش های قلیایی و سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که مصالح سرباره EAF از نظر حجم پایدار است و در بتن قابل استفاده است. در مخلوط RCCP، سرباره EAF به عنوان جایگزینی برای مصالح درشت طبیعی با سه درصد (یعنی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪) و سیمان تا حدی توسط خاکستربادی در سه سطح محتوای (یعنی ۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪) شده است. وزن واحد و خصوصیات مکانیکی (یعنی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک) RCCP از طریق برنامه آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج، وزن واحد تازه و سخت شده مشابه RCCP معمولی است. علاوه بر این، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک RCCP با افزایش نسبت مصالح سرباره EAF در هر سنی کاهش یافته است. با این وجود، ترکیب سرباره EAF و خاکستربادی ۲۰٪ در مخلوط RCCP باعث بهبود خواص مکانیکی در سنین طولانی مدت می شود. این مطالعه ثابت کرده است که RCCP حاوی مصالح سرباره EAF و خاکستر بادی می تواند برای توسعه روسازی به عنوان یک سطح پوشیده در معرض استفاده شود. مقدار رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک با افزایش سرباره، افزایش یافته است در حالیکه با افزایش خاکستر بادی این مقادیر کمی کاهش یافته اند. دو نوع سنگدانه (یعنی سرباره EAF 100٪ و سرباره EAF 50٪ به همراه ۵۰٪ سنگ خردشده) مطابق ASTM D1883 تهیه شدند. هنگامی که سرباره EAF برای جایگزینی سنگ خرد شده استفاده شد، کاهش اندکی در مقاومت فشاری، تقسیم مقاومت کششی و مدول الاستیک بوجود آمد. با این وجود، سرباره EAF را می توان ۱۰۰٪ درشت دانه را در RCCP جایگزین کرد تا تولید روسازی هایی که نیازمند سطح پوشیده هستند را برآورده کند. نتیجه ثابت می کند که RCCP حاوی مصالح سرباره EAF و ۲۰ درصد خاکستر، بتن مناسبی تولید می کند، که می تواند برای آسفالت ها مورد استفاده قرار گیرد[۶۴].

مطالعه روح الامینی با هدف بررسی تأثیر جایگزینی جزئی و کامل سنگدانه های طبیعی با سرباره فولادی قوس الکتریکی بر خصوصیات مکانیکی و شکستگی بتن فشرده شده غلتکی RCC انجام شده است. مخلوط های بتنی متنوعی حاوی سرباره فولادی ریز و درشت، برای یافتن تأثیر هر قسمت بر عملکرد ملات RCC و مخلوط بتنی آماده شدند. برای بررسی خصوصیات مکانیکی نمونه های مخلوط RCC، آزمایش های مختلفی از جمله کششی، فشاری، خمش نیمه دایره ای و تست های خمش سه نقطه انجام شد. نتایج نشان داد که سرباره فولادی ریز و

^{۱۹} Lam et al

درشت اثرات متفاوتی بر روی خواص مکانیکی RCC دارد. نتایج نشان داد که در اثر جایگزین شدن سرباره با ریزدانه ها، پاسخ مکانیکی به دست آمده با افزایش مقدار سرباره فولادی، که دارای سطح ویژه خاصی است، کاهش می یابد. در مجموع پنج سری مخلوط های RCC در آزمایشات آزمایشگاهی تهیه شدند. پنج بخش شامل N برای مخلوط با مصالح طبیعی، F25 برای ۲۵ درصد (حجمی) جایگزین سنگدانه ریز با سرباره ریز، C50 برای ۵۰٪ جایگزین مصالح درشت با سرباره درشت و به همین ترتیب F50 و C100 تهیه شدند. نتایج استحکام فشاری و کششی غیر مستقیم نشان داد که هنگام استفاده از ۲۵٪ سرباره ریزدانه، مقاومت فشاری تغییر نکرده است. با این حال، مقدار بیشتر سرباره ریز مقاومت فشاری را کاهش می دهد، به طوری که مقاومت فشاری نمونه F50 در مقایسه با مخلوط کنترلی حدود ۲۵٪ کاهش یافته است. با این حال، نتایج حاصل از مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم نمونه شامل ترکیب سرباره درشت نشان داد که افزایش محتوای سرباره فولاد باعث افزایش مقاومت فشاری می شود. با توجه به این یافته می توان نتیجه گرفت که جایگزینی جزئی قطعات ریز توسط سرباره فولاد باعث کاهش مقاومت فشاری شود. تنها سرباره ریزدانه ۲۵٪ به عنوان محتوای بهینه برای استفاده به عنوان جایگزین مصالح طبیعی ریزدانه توصیه می شود. جایی که، ترکیب سرباره تا ۲۵٪ باعث افزایش مقاومت کششی و مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته می شود، اما افزودن بیشتر سرباره پارامترهای ذکر شده را کاهش می دهد [۶۵].

تحقیق انجام شده توسط شریف و همکاران ارزیابی اثر جایگزینی بخشی از سنگدانه درشت در بتن را با سرباره مورد بررسی قرار داد، مقاومت فشاری، سرعت پالس اولتراسوند، جذب مخلوط ها با نسبتی از سرباره در بخشی از درشت دانه از ۴۵٪، ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰ و ۶۵٪ از وزن کل سنگدانه مورد بررسی قرار گرفت. یافته های آنها نشان داد که بتن دارای سرباره مقاومت فشاری بالاتری و مقاومت کششی کمی پایین تر در مقایسه با بتن مرجع دارد. همچنین با افزایش سرباره میزان جذب و تخلخل مخلوط کاهش می یابد، در حالی که سرعت پالس اولتراسوند با افزایش سرباره افزایش می یابد که ممکن است مربوط به مدول بیشتر بتن الاستیسیته با سرباره در مقایسه با بتن مرجع باشد [۶۶].

بر اساس نتایج تحقیقات مستوفی نژاد و نظری منفرد در دانشگاه صنعتی اصفهان، استفاده از ترکیب ۱۰ درصد سرباره و ۱۵ درصد پودر سنگ آهک جایگزین سیمان، ضمن اقتصادی کردن طرح مخلوط، سبب افزایش دوام بتن ها می شود. در این تحقیق، بکارگیری چنین ترکیبی از مواد سیمانی، برای ساخت بتن های در مجاورت یون سولفات و از جمله ابنیه مسیر راه و پایه های پل توصیه شده است [۶۷].

بر اساس نتایج حاصله از الدیب و همکاران تأثیر سرباره کوره بلند آهن گذاری بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن های غلتکی روسازی نتیجه گیری های زیر قابل ارائه می باشند :

الف- جایگزینی بخشی از سیمان با سرباره در نسبت آب به مواد سیمانی برابر، موجب کاهش مقاومت های بتن های غلتکی تا سن ۹۰ روز شده است. با افزایش درصد جایگزینی میزان کاهش در مقاومت بیشتر می گردد.

ب- کاربرد سرباره به عنوان جایگزین بخشی از سیمان باعث افزایش کارایی مخلوط های بتن غلتکی می گردد. به طوریکه با کاربرد ۵۰ درصد سرباره با ریزی ۲۸۵۰ گرم بر سانتی مترمربع و جایگزینی آن با سیمان کارایی مخلوط بتن غلتکی در حدود ۲/۵ برابرافزایش یافت. ضمناً با افزایش سطح ویژه سربار مصرفی مقدار بهبود در کارایی نیز افزایش یافت.

ج- سطح ویژه سرباره کوره آهن گدازی تأثیر قابل توجهی در عملکرد آن به عنوان ماده مکمل سیمانی در بتن های غلتکی دارد. تحقیق حاضر نشانگر امکان افزایش مقاومت بتن های غلتکی، به میزان حدود ۳۰ درصد از طریق افزایش سطح ویژه و رساندن آن به حدود ۲۸۵۰ می باشد.

د- با افزایش سطح ویژه سربار و رساندن آن به حدود ۲۸۵۰ کاهش قابل ملاحظه ای (در حدود ۴۰ درصد) در نفوذپذیری مخلوط های بتن غلتکی دیده شد [۶۸].

پالانکار و همکاران خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی سرباره آسیاب شده کوره بلند را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق آن ها دو مخلوط بتنی با ۴۵۰ و ۵۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب از سیمان پرتلند معمولی و دو مخلوط معادل کل مواد سیمانی با ۳۰ درصد جایگزینی سرباره آسیاب شده کوره بلند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بتن با سرباره کوره بلند آسیاب شده دارای مقاومت اولیه بالاتر، نفوذپذیری کمتر و دوام بهبود یافته حتی در سه روز بعد از عمل آوری می باشد. همچنین سرباره کوره بلند آسیاب شده باعث بهبود کارایی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی می شود. علاوه بر این بهبود خواص مکانیکی برای بتن با نسبت آب به سیمان کمتر، بیشتر مشاهده گردید [۶۹].

از سرباره ی کوره ی بلند آهن گدازی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، در راستای کاهش هزینه ساخت بتن و کاهش مصرف سیمان در تحقیق کالیس و همکاران استفاده گردیده است. همچنین از دوده سیلیسی نیز در طرح مخلوط های مختلف و به منظور بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی استفاده شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که استفاده از سرباره گرچه موجب کاهش مصرف سیمان شده اما افت کارایی، کاهش مقاومت فشاری و کاهش شدید دوام در برابر پوسته شدگی را باعث شده است؛ اما استفاده از پودر میکرو سیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان هم به طور مجزا و هم به صورت ترکیبی با سرباره، در طرح مخلوطهای مختلف، کارایی

۲۰ Palankar at el

۲۱ Calis at el

بتن غلتکی تازه را در محدوده مطلوب قرار داده و علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، موجب بهبود شاخص دوام نیز گردیده است [۷۰].

در مطالعه ایسلام و رایحان^{۲۲} سرباره فولادی را در تولید RCC برای کاهش ذخیره سازی سرباره و همچنین افزایش پایداری در بخش ساخت و ساز با استفاده از یک محصول جایگزین سنگدانه های طبیعی گنجانده است. کارایی و ویژگی های مقاومت فشاری RCC شامل ترکیبات مختلف (یعنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) درصد از سرباره فولادی ارزیابی می شود. با روش تراکم خاک نسبت مخلوط از رطوبت مطلوب و حداکثر چگالی خشک مخلوط تعیین شد. دو نمونه کلاس مقاومت با محتوای مختلف سیمان ۱۳ و ۱۴ درصد تهیه شد. نتایج بدست آمده با ویژگی های مقاومت RCC تهیه شده با سنگدانه های طبیعی و سرباره مقایسه شد. نتایج تجربی نشان داد که تا ۳۰٪ جایگزینی سرباره نتایج RCC معمولی را ارائه می دهد [۷۱].

توفولو و همکاران^{۲۳} امکان سنجی روسازی بتن غلتکی را با جایگزینی سنگدانه های طبیعی و سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS یا سرباره کوره اکسیژن پایه BOFS ارزیابی کردند. رفتار نمونه ها و عملکرد مکانیکی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که هر دو EAFS و BOFS مقاومت فشاری RCC و مدول ارتجاعی را افزایش می دهند. RCC تولید شده با سنگدانه های BOFS به دلیل دارا بودن مقدار زیادی مواد شیمیایی ریزتر از ۷۵ میکرومتر و تخلخل بیشتر، تا حدودی گسترش می یابد. بتن دارای EAFS در تجزیه و تحلیل دوام پایداری بوده است. در نتیجه، از طریق نسبت های بهینه مخلوط و با استفاده از تراکم مناسب، می توان روسازی هایی با سرباره فولادی EAFS به شیوه های کارآمد، اقتصادی و سازگار با محیط زیست تولید کرد. BOFS همچنین نتایج امیدوار کننده ای را نشان داد اما نیاز به تحقیقات بیشتری دارد [۷۲].

^{۲۲} Islaam & Raihan

^{۲۳} Toffolo et al

جمع بندی پیشینه تحقیق :

نویسندگان	سال انتشار	موضوع تحقیق	پارامترهای مورد بررسی	خلاصه نتایج
بانثیا و همکاران	۱۹۹۲	نفوذپذیری روسازی بتن غلتکی	نفوذپذیری دوام بتن در برابر یخ زدگی - ذوب شدگی	۱- میکروسیلیس موجب کاهش نفوذپذیری می شود. ۲- نسبت آب به سیمان تاثیر محسوسی روی نفوذپذیری ندارد. ۳- نمونه ها مقاوم در برابر تا ۳۰۰ سیکل یخ زدگی - ذوب شدگی ۴- نحوه عمل آوری تاثیر بر نفوذپذیری و دوام ندارد.
فردین و همکاران	۲۰۲۰	روسازی بتن غلتکی با سنگدانه های بتنی بازیافتی RCA	آزمون تراکم - مقاومت فشاری - مقاومت کششی - مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته - تخلخل - چگالی و جذب آب	۱- افزایش RCA موجب کاهش مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و خمشی و فشاری
سان و همکاران	۱۹۹۸	عملکرد خستگی بر روسازی بتن غلتکی با خاکستر بادی	پدیده خستگی در حالت استفاده و عدم استفاده از خاکستر	۱- بتن غلتکی از مقاومت خستگی بهتری در مقایسه با بتن معمولی برخوردار است. ۲- مقاومت بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی در برابر خستگی به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد نسبت به مقاومت بتن غلتکی بدون خاکستر بادی بیشتر می باشد.
کوزارد و همکاران	۲۰۱۰	امکان استفاده از مصالح بازیافتی از روسازی های بتنی در روسازی های بتن غلتکی	وزن مخصوص - آزمایشهای مقاومت در برابر گسیختگی - اندازه گیری ضریب لس آنجلس	در مقایسه بین نمونه های ساخته شده از مصالح طبیعی و بازیافتی مشخص شد که تراکم هر دو طرح اختلاط در محدوده یکسانی قرار دارد؛ اما انرژی لازم برای تراکم بتن غلتکی ساخته شده با مصالح بازیافتی بسیار بیشتر است. این امر به دلیل جذب آب بسیار بالای مصالح بازیافتی است. مقاومت فشاری بیشتر نمونه های ساخته شده با مصالح طبیعی نسبت به نمونه های مصالح بازیافتی

آقایان و خفاجه	۲۰۲۱	ارزیابی چرخه عمر ، خواص مکانیکی و دوام روسازی بتن غلتکی حاوی مواد زائد بازیافتی	ارزیابی خواص مکانیکی و دوام بتن با مصالح جایگزین سرامیک (سنگدانه) و پودرذغال سنگ (سیمان)	۱- استفاده از ضایعات سرامیکی زمان تراکم و چگالی مخلوط های تازه را بترتیب افزایش و کاهش می دهد. ۲- استفاده از این مواد باعث کاهش گازهای گلخانه ای شده است و ۱۵٪ از ضایعات سرامیکی و ۸٪ از پودر ذغال سنگ گازهای گلخانه ای را تا ۱۰٪ کاهش داد. ۳- افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بترتیب ۱۴٪-۳۹٪-۲۰٪ با ۱۵٪ سرامیک
رحمانی-شربت دار	۲۰۲۱	تأثیر محتوای سیمان (یا نسبت سیمان به سنگدانه ها) بر پارامترهای شکست و شکل پذیری روسازی بتنی غلتکی	آزمایش خمشی سه نقطه با چندین نسبت سیمان به سنگدانه	استفاده از ۳ رویکرد برای ارزیابی پارامترهای شکست شامل روش شکست از کار WFM ، روش اثر اندازه SEM و روش اثر مرزی BEM
صابری کرهرودی	۱۳۹۵	تاثیر استفاده از خرده لاستیک بر روسازی بتن غلتکی	جایگزینی خرده لاستیک با ریزدانه مصالح طبیعی و بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی	۱- افزایش ۹٪ مقاومت فشاری تا ۱۰٪ جایگزینی ۲- افزایش مقاومت خمشی تا ۵٪ جایگزینی ۳- کاهش درصد جذب آب
عسگری	۱۳۹۷	ارزیابی آزمایشگاهی اثر استفاده از خرده لاستیک بر روسازی های بتن غلتکی	جایگزینی خرده لاستیک با ریزدانه مصالح طبیعی و ارزیابی خصوصیات بتن شامل وزن مخصوص ، مقاومت فشاری ، مقاومت خمشی و درصد جذب آب	۱- افزایش مقاومت فشاری و خمشی تا درصد مشخصی ۲- کاهش درصد جذب آب نمونه

۱- افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روز تا ۱۰٪ خرده لاستیک بدون بخار سیلیس ۲- افزایش مقاومت فشاری تا ۲۰٪ خرده لاستیک با بخار سیلیس ۳- افزایش مقاومت خمشی تا ۵٪ خرده لاستیک با و بدون بخار سیلیس	جایگزینی خرده لاستیک با ریزدانه با و بدون بخار سیلیکا و بررسی خواص مکانیکی بتن	تاثیر ذرات لاستیکی ضایعاتی و بخار سیلیس بر خواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی	۲۰۱۶	فخری و صابری
۱- افزایش سختی شکست با افزایش مقدار سیمان تا ۲۰٪ ۲- چقرمگی و شکست بیشتر مخلوط حاوی لاستیک نسبت مخلوط حاوی RAP-۳ افزایش انرژی جذب در مخلوط حاوی RAP و لاستیک-۴ کاهش سختی و مدول الاستیسیته مخلوط حاوی RAP و لاستیک	سختی و چقرمگی و شکست نمونه ها	تجزیه و تحلیل رفتار ترک خوردگی مخلوط های بتن غلتکی شامل آسفالت بازسازی شده و لاستیک خرد شده	۲۰۱۷	فخری و عموسلطانی
۱- درصد مناسب جایگزینی ۵٪ لاستیک با ریزدانه بصورت حجمی ۲- بهبود عملکرد بتن غلتکی با اصلاح زبری سطح ذرات لاستیکی	استفاده از لاستیک جایگزین ریزدانه	ارزیابی اثر روش های مختلف عمل آوری با درصد های جایگزینی مختلف ریزدانه بر روی خواص بتن غلتکی	۲۰۱۶	سلیح و آبد
بهبود عملکرد خستگی بتن غلتکی با جایگزینی مصالح ریزدانه با لاستیک و افزودن نانو سیلیس	خستگی بتن غلتکی حاوی لاستیک و نانوسیلیس	عملکرد خستگی روسازیهای با جایگزینی جزئی RCC مصالح ریزدانه با لاستیک خرد شده و افزودن نانو سیلیس	۲۰۱۸	ادامو، محمد و لیبو
۱- نبود تغییرات قابل توجه تا ۵٪ جایگزینی ۲- مقاومت فشاری بیشتر نمونه با جایگزینی شن با دانه های لاستیک نسبت به مقاومت فشاری نمونه با جایگزینی سیمان با دانه های لاستیک ۳- رفتار مقاومت خمشی عکس مقاومت فشاری	جایگزینی دانه های لاستیک با شن و سیمان	جایگزینی ضایعات لاستیک برای سنگدانه و پرکننده در بتن	۲۰۰۹	گنجیان و همکاران

صابری کرهرودی- فخری	۱۳۹۵	تاثیر استفاده از خرده لاستیک بر روسازی بتن غلتکی	جایگزینی خرده لاستیک با ریزدانه طبیعی و افزودنی میکروسیلیس با سیمان	۱-افزایش مقاومت فشاری نمونه دارای ۱۰٪ دانه های لاستیک ۲-افزایش مقاومت فشاری نمونه دارای ۲۰٪ دانه های لاستیک با افزودنی میکروسیلیس
سوکونتاسوکول و همکاران	۲۰۰۹	استفاده از خرده لاستیک برای بهبود خواص حرارتی و صوتی پانل های پیش ساخته بتنی	جایگزینی خرده لاستیک با ماسه طبیعی	کاهش ۲۸٪ مقاومت خمشی با جایگزینی ۱۰٪ خرده لاستیک
فخری و عموسلطانی	۲۰۱۷	اثرات آسفالت بازیافتی و پودرلاستیک بر ویژگی های روسازی بتن غلتکی	ارزیابی خصوصیات مکانیکی بتن با جایگزینی خرده لاستیک و RAP با سنگدانه ها	ترکیب بهینه ۱۰٪ لاستیک و ۵۰ RAP % با استفاده از تحلیل واریانس ANOVA
دیوید دودو و آرین	۲۰۱۵	استفاده از لاستیک های دور ریخته شده اتومبیل به عنوان مصالح درشت مصنوعی در روسازی های بتنی	افزودن لاستیکهای بازیافتی به بتن	۱-افت قابل توجه اسلامپ و کارایی و مقاومت فشاری بتن ۲-چگالی کمتر و مقاومت بیشتر در برابر ضربه و چقرمگی ۳-افزایش شکل پذیری و افزایش اندک استحکام خمشی
آدامو، محمد و همکاران	۲۰۱۷	عملکرد مکانیکی روسازی بتن غلتکی حاوی پودرلاستیک و نانو سیلیس	جابجایی حجمی ریزدانه با خرده لاستیک و جابجایی وزنی افزودنی نانو سیلیس با سیمان و ارزیابی خواص مکانیکی	۱-افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش با ۱۰٪ خرده لاستیک ۲-افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی با ۲٪ نانو سیلیس و تاثیر منفی نانو سیلیس برای درصدهای بالاتر ۳-مخلوط بهینه با کارایی و دوام بالا با جایگزینی ۱۰٪ خرده لاستیک و ۱/۱۳٪ نانو سیلیس

۲۰۱۶	فخری و صابری	اثرات تکه های زباله لاستیک و دوده سیلیس بر ویژگیهای مکانیکی روسازی بتن غلتکی	استفاده از لاستیکهای بازیافتی در روکش بتن غلتکی و جایگزینی سیمان با دوده سیلیس و ارزیابی خصوصیات اساسی بتن غلتکی، از جمله وزن واحد، مقاومت فشاری، استحکام خمشی، و جذب آب	۱-افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روز تا ۱۰٪ لاستیک بدون دوده سیلیس و افزایش تا ۲۰٪ با دوده سیلیس ۲-تاثیرگذاری مثبت لاستیک و سیلیس کنارهم، پیشرفت ۳۷٪ مقاومت فشاری در نمونه دارای لاستیک و سیلیس نسبت به نمونه دارای سیلیس ۳-افزایش مقاومت خمشی تا ۵٪ با و بدون دوده سیلیس
۲۰۱۴	مدرس و حسینی	خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی خاکستر پسته برنج را با مصالح روسازی بازیافتی	ارزیابی خواص مکانیکی بتن غلتکی دارای RAP و جایگزینی آن با ریزدانه و درشت دانه	۱-جایگزینی درشت دانه با RAP مقاومت فشاری بیشتری نسبت به جایگزینی ریزدانه دارد.
۲۰۲۰	بوستا و همکاران	آزمایش تجربی و مدل سازی بتن غلتکی حاوی ضایعات RAP به عنوان سنگدانه ها	خصوصیات مکانیکی شامل مدول،مقاومت کششی، فشاری در بتن غلتکی حاوی RAP	۱-با افزایش RAP درصد رطوبت بهینه افزایش می یابد. ۲-وزن واحد مخلوط RAP٪۱۰۰ حدودا ۱۲٪ کمتر از بتن کنترلی می باشد. ۳-مقاومت فشاری RAP٪۱۰۰ حدودا ۷۰٪ کمتر از نمونه کنترلی است. ۴-مقاومت کششی غیرمستقیم RAP٪۱۰۰ حدودا ۴۰٪ کمتر از نمونه کنترلی است. ۵- نمونه حاوی RAP٪۶۰ مورد تایید است.
۲۰۱۵	ستاری،دیب و کدري	آزمایش های مکانیکی و شبیه سازی روسازی بتن غلتکی حاوی زباله های آسفالت بازیافتی	خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی حاوی RAP	۱-جایگزینی ۱۰۰٪ ریزدانه حدودا ۳۲٪ کاهش مقاومت فشاری ۲-جایگزینی ۱۰۰٪ درشت دانه حدودا ۵۵٪ کاهش مقاومت فشاری ۳-جایگزینی ۱۰۰٪ RAP کاهش مقاومت کششی حدودا ۲۶٪ ۴- جایگزینی ۵۰٪ ریز و درشت مورد تایید بتن غلتکی

۱- ۵۰٪ جایگزینی RAP حدود ۲۱٪ مقاومت فشاری و ۳۴٪ مقاومت کششی را کاهش می دهد. ۲- افزایش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و بهبود دوام با استفاده از دوده سیلیس ۳- استفاده از ۱۵٪ خاکستریادی برای تولید مخلوط پایدار بتن غلتکی بلامانع است. ۴- افزایش ۱۲٪ رطوبت بهینه با جایگزینی ۵۰٪ RAP	ارزیابی خصوصیات بتن غلتکی حاوی RAP و افزودنی های جایگزین سیمان	امکان اجرای روسازی بتن غلتکی حاوی ذرات مختلف روسازی آسفالتی بازیابی شده	۲۰۱۹	دبارما و همکاران
مقاومت فشاری مورد نیاز ۲۷/۶ مگاپاسکال برای مخلوط های RCCP توسط تمام مخلوط های RAP به دست آمد، به جز مخلوط حاوی ۱۰۰٪ RAP، با این وجود، با همان مخلوط به حداقل معیار مقاومت خمشی ۳/۶۷ مگاپاسکال رسید. نتایج دوام نشان داد که ترکیب RAP برای مخلوط RCCP می تواند از نظر تخلخل کمتر، کاهش جذب آب، نرخ اولیه و ثانویه پایین تر جذب آب مفید باشد، با این حال، مخلوط ها هنگامی که در معرض محیطهای تهاجمی سولفات و کلرید قرار گرفتند، تلفات چشمگیری را متحمل شدند.	مقدار بهینه سازی RAP درشت، ریز و کل برای مخلوط بتنی RCCP براساس ویژگی های مختلف تازه، مکانیکی و دوام	استفاده از ضایعات صنعتی و کشاورزی برای تولید مخلوط های روسازی بتن غلتکی پایدار حاوی سنگدانه های روسازی آسفالتی احیا شده	۲۰۲۰	رانسیچانگ و دبارما
در سن ۲۸ روزگی تمام مخلوطهای RAP بجز ۱۰۰٪ حداقل مقاومت مورد نظر را نتیجه می دهند. ۵۰٪ RAP درشت و هر درصدی از RAP ریز می تواند در روسازی بتن غلتکی مورد استفاده گیرد. برخلاف مقاومت فشاری، مقاومت خمشی RAP درشت کمی بهتر از مخلوط RAP ریز می باشد.	ارزیابی RAP ریز و درشت در بتن غلتکی	بررسی آزمایشگاهی بتن سیمانی پرتلند حاوی روسازی آسفالت بازیافتی	۲۰۱۳	هوانگ و ستاری و همکاران

۱- بتن غلتکی مقاومت بیشتری در برابر روغن های ریخته شده و مواد چرب موجود در سطح جاده دارد. ۲- با افزایش محتوای ماده RAP خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی کاهش می یابد. ۳- اگر ۱۰۰٪ ماسه های طبیعی جایگزین ۱۰۰٪ مواد ریز RAP شوند، مقاومت فشاری حدود ۳۰٪ کاهش می یابد. در صورت استفاده ۱۰۰٪ از مواد RAP، کاهش در حدود ۵۰٪ خواهد بود.	ارزیابی خصوصیات روسازی بتن غلتکی حاوی RAP	ارزیابی استفاده از RAP در ساخت روسازی های بتن غلتکی	۲۰۱۸	دپوانداری و همکاران
۱- جایگزینی نسبی سیمان با ۲٫۵٪ و ۵٪ SF باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش چگالی خشک مخلوط های RCC ۲- جایگزینی سنگدانه های NA با RCA و RAP در مخلوط های RCC باعث کاهش خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته ۳- با افزایش محتوای RCA جذب آب افزایش یافت که مهمترین شاخص برای دوام مواد است، در حالی که با افزایش محتوای RAP جذب آب را کاهش یافته است	ارزیابی خواص مکانیکی و فیزیکی مخلوط های RCC شامل استحکام فشاری، استحکام کششی، ضریب الاستیسیته، مدول پارگی و چگالی	ارزیابی پتانسیل استفاده از مصالح بازیافتی آسفالت RAP و مصالح بازیافتی بتن RCA و بخار سیلیس SF در تولید بتن فشرده غلتکی RCC	۲۰۲۱	اشتیا و همکاران
۱- RCC با استفاده از چسبنده ژئوپلیمر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی بالاتری را در مقایسه با مخلوط حاوی سیمان پرتلند معمولی ۲- RCC با استفاده از چسبنده ژئوپلیمر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی را به ترتیب در محدوده ۴/۸-۲۱/۱ مگاپاسکال، ۳/۱۸-۳۵ گیگاپاسکال و ۹/۲-۴/۱ مگاپاسکال نتیجه می دهد.	ارزیابی مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی	ویژگی های مکانیکی و ریزساختاری بتن متراکم غلتکی تولید شده از روکش آسفالت بازیافتی RAP و چسب سیمان ژئوپلیمری GPC	۲۰۲۱	ختاک و همکاران

۱- ترکیب RAP مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیر مستقیم را کاهش می دهد. ۲- مقدار RAP بیشتر ، انعطاف پذیری بیشتری در RCC ایجاد می کند ۳- شاخص سختی نشان می دهد که افزایش محتوای RAP منجر به افزایش ۴۳ درصدی ظرفیت جذب انرژی RCC می شود	ارزیابی مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیر مستقیم	بررسی خواص مکانیکی بتن فشرده غلتکی شامل روسازی آسفالت بازیابی شده RAP	۲۰۲۰	احمدی و همکاران
۱- افزودن RAP به مخلوط باعث کاهش مقاومت مکانیکی مخلوط بتن فشرده غلتکی RCC می شود. بهترین استحکام مکانیکی با ۵۰٪ جایگزینی RAP بدست آمد. ۲- برای افزایش مقاومت مکانیکی RCC ساخته شده با ۵۰٪ RAP ، از میکروسیلیس با جایگزینی نسبت به سیمان در درصدهای ۳٪ ، ۶٪ ، ۹٪ و ۱۲٪ استفاده شد. ۳- RCC با ۵۰٪ RAP و ۹٪ میکروسیلیس حدود ۲۰٪ مقاومت فشاری بیشتری دارد. همچنین افزایش در مقاومت کششی و مقاومت خمشی به ترتیب ۶ و ۲ درصد بود.	ارزیابی مشخصات مکانیکی	بررسی تجربی تأثیر میکروسیلیس بر روسازی بتنی فشرده غلتکی ساخته شده از مواد روکش آسفالت بازیافتی	۲۰۲۰	رضایی و همکاران
نوع و سن RAP ، غلظت آسفالت و ذرات تجمع یافته ، دانه بندی RAP و سطح های جایگزینی RAP می تواند به طور قابل توجهی بر قدرت و دوام مخلوط های RCCP تأثیر بگذارد. از دیدگاه پایداری، اکثر محققان توصیه می کنند که تا ۵۰٪ از RAP را می توان برای جایگزینی تا حدی سنگدانه های طبیعی در مخلوط های RCCP استفاده کرد.	خواص مکانیکی و دوام	دستیابی به پایداری در مخلوط های روسازی بتنی با غلتک با استفاده از سنگدانه های روسازی آسفالتی بازیابی شده	۲۰۲۰	دببارما و رانسینچانگ

لام و همکاران	۲۰۱۷	امکان استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی EAF و خاکستربادی را در بتن غلتکی RCCP	سرباره EAF به عنوان جایگزینی برای مصالح درشت طبیعی با سه درصد (یعنی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪) و سیمان تا حدی توسط خاکستربادی در سه سطح محتوای (یعنی ۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪) وزن واحد و خصوصیات مکانیکی (یعنی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک) RCCP	مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک RCCP با افزایش نسبت مصالح سرباره EAF کاهش یافته است. با این وجود، ترکیب هردرصد سرباره EAF و خاکستربادی ۲۰٪ در مخلوط RCCP باعث بهبود خواص مکانیکی در سنین طولانی مدت می شود.
روح الامینی	۲۰۱۹	تأثیر سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی بر خواص مکانیکی و شکست بتن غلتکی	آزمایش های مختلفی از جمله کششی، فشاری، خمش نیمه دایره ای و تست های خمش سه نقطه	در اثر جایگزین شدن سرباره با ریزدانه ها، پاسخ مکانیکی به دست آمده با افزایش مقدار سرباره فولادی، که دارای سطح ویژه خاصی است، کاهش می یابد. علاوه بر این، ترکیب سرباره فولادی درشت باعث افزایش چفت و بست بیشتر به دلیل زاویه دار بودن و زبری زیاد آن می شود که باعث افزایش خواص مکانیکی و شکستگی می شود
شریف و همکاران	۲۰۰۳	مقایسه خواص سرباره فولادی و سنگ آهک خرد شده	مقاومت فشاری، سرعت پالس اولتراسوند، جذب آب	بتن دارای سرباره مقاومت فشاری بالاتری و مقاومت کششی کمی پایین تر در مقایسه با بتن مرجع دارد. همچنین با افزایش سرباره میزان جذب و تخلخل مخلوط کاهش می یابد، در حالی که سرعت پالس اولتراسوند با افزایش سرباره افزایش می یابد که ممکن است مربوط به مدول بیشتر بتن الاستیسیته با سرباره در مقایسه با بتن مرجع باشد.

مستوفی نژاد و نظری مفرد	۲۰۱۹	تأثیر سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی بر خواص مکانیکی و شکست بتن غلتکی ، "مصالح ساختمانی و ساختمانی	جایگزینی سرباره با مصالح دانه ای و پودرسنگ اهک با سیمان	۱-افزایش دوام بتن با استفاده از ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ سنگ آهک ۲-امکان استفاده از این بتن در مجاورت یون سولفات و ابنيه مسير
الديب و همکاران	۲۰۱۲	عملکرد مخلوط های بتنی با سنگدانه سرباره فولادی تولید شده در منطقه خلیج فارس	تأثیر سرباره کوره بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن های غلتکی روسازی با جایگزینی سرباره با سیمان	۱-کاهش مقاومت فشاری ۲-افزایش کارایی، ۵۰٪سرباره کارایی حدود ۲,۵ برابر
پالانکار و همکاران	۲۰۱۶	مطالعات دوام بر روی مخلوط های بتنی سازگار با محیط زیست با جایگزینی سرباره فولادی به عنوان سنگدانه های درشت	خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی سرباره آسیاب شده کوره بلند	۱- بتن با سرباره کوره بلند دارای مقاومت اولیه بالاتر، نفوذپذیری کمتر و دوام بهتر ۲-بهبود کارایی،مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

کالیس و همکاران	۲۰۱۹	بررسی بتن فشرده غلتکی: مرور ادبیات	استفاده از سرباره و دوده سیلیس در طرح اختلاط	سرباره گرچه موجب کاهش مصرف سیمان شده اما افت کارایی، کاهش مقاومت فشاری و کاهش شدید دوام در برابر پوسته شدگی را باعث شده است؛ اما استفاده از پودر میکرو سیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان هم به طور مجزا و هم به صورت ترکیبی با سرباره، در طرح مخلوطهای مختلف، کارایی بتن غلتکی تازه را در محدوده مطلوب قرار داده و علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، موجب بهبود شاخص دوام نیز گردیده است
ایسلام و رایحان	۲۰۲۱	استفاده از سرباره فولادی برای تولید RCC به منظور کاهش ذخیره سازی سرباره و همچنین افزایش پایداری روسازی	ارزیابی کارایی و ویژگی های مقاومت فشاری RCC شامل ترکیبات مختلف (یعنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) درصد از سرباره فولادی	نتایج تجربی نشان می دهد تا ۳۰٪ جایگزینی سرباره نتایج بتن RCC را نتیجه می دهد.
توفولو و همکاران	۲۰۲۱	امکان سنجی روسازی بتن غلتکی را با جایگزینی سنگدانه های طبیعی و سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS یا سرباره کوره اکسیژن پایه BOFS	رفتار نمونه ها و عملکرد مکانیکی	هر دو EAFS و BOFS مقاومت فشاری RCC و مدول ارتجاعی را افزایش می دهند. بتن دارای EAFS در تجزیه و تحلیل دوام پایداری بوده است. در نتیجه، از طریق نسبت های بهینه مخلوط و با استفاده از تراکم مناسب، می توان روسازی هایی با سرباره فولادی EAFS به شیوه های کارآمد، اقتصادی و سازگار با محیط زیست تولید کرد.

فصل ۳ :

طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی

در ارتباط با طرح اختلاط روسازی های بتن غلتکی رویکردهای مختلفی موجود می باشد. وجود این اختلاف ها به این دلیل است که با وجود استفاده از مصالح بتن معمولی در ساخت بتن غلتکی، در طرح اختلاط از روش های مبتنی بر مکانیک خاک استفاده می شود. نکته در خور توجه این است که امکان استفاده از بتن معمولی حتی با ایجاد تغییراتی در میزان ماسه به سیمان، کاهش میزان آب، افزایش سنگدانه های نرم و تغییر در نسبت آب به سیمان، به عنوان بتن غلتکی نیست. تفاوت اساسی بین روش تعیین طرح اختلاط بتن معمولی و روش طرح اختلاط بتن غلتکی در آغاز به خاطر ماهیت خشک و کارایی پایین این نوع بتن و همچنین استفاده از دانه بندی سنگدانه های غیر رایج در طرح اختلاط آن می باشد [۷۳]. با توجه به حساسیت رفتاری بتن غلتکی به نسبت های اجزای تشکیل دهنده و در راستای فراهم آوردن بستری مناسب برای هر چه بیشتر اقتصادی کردن رویه های بتن غلتکی با حفظ مشخصات فنی، تحقیقاتی بر روی نسبت های بهینه مصالح تشکیل دهنده و افزودنی ها و همچنین بررسی امکان غیر شستگی آن ها صورت گرفت که بر اساس بررسی های آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر قابل ارائه است:

۱- با انتخاب نسبت های صحیح از مصالح می توان از افزایش عیار سیمان جلوگیری کرد و با عیار حدود ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نتایج قابل قبولی در محدوده آیین نامه ای گرفت.

۲- افزودن فیلر طبیعی، تأثیرات قابل توجهی بر مشخصات کارایی و مقاومتی بتن دارد و درصد مصرفی بهینه این مصالح در پروژه حاضر ۷/۵ درصد وزنی مصالح ریز دانه است و حضور بیش از این مقدار سبب افت روانی و مقاومتی خواهد شد. آشکار است در پروژه های دیگر باید درصد بهینه به دست آید.

۳- میزان مصالح ریز تر از الک ۲۰۰ تأثیر مستقیمی بر مشخصات بتن تازه (روانی) و بتن ساخته شده (مقاومت فشاری، خمشی و نفوذپذیری و سطح رویه) دارد.

۴- در صورتی که مقدار مصالح ریزتر از الک ۲۰۰، ۲/۵ تا ۷/۵ درصد باشد، مصالح سنگی بدون شستشو در بتن غلتکی قابل مصرف است، البته به شرط آن که مصالح ریز دانه با خاصیت غیر خمیری باشند. این مطلب با کنترل شرایط کارگاهی در ساخت رویه های راه قابل کاربرد است.

۵- با افزایش عیار سیمان، دانه های ریز سیمان جایگزین مصالح ریز تر از الک ۲۰۰ می شوند و بنابراین در عیار های کم سیمان امکان استفاده از درصد بیشتر از مصالح غیر شسته بیشتر است. به این ترتیب که در عیار های کمتر از ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب محدوده بهینه ۲/۵ تا ۷/۵ درصد از مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ افزایش می یابد. می توان با استفاده از درصد بهینه مصالح، مقدار آب مصرفی را تا حد قابل توجهی کاهش داد. این امر در کارگاه های مناطق گرم اهمیت دارد.

۶- فوق روان کننده ها در مخلوط های بتن غلتکی حاوی بیش از درصد بهینه ریزتر از الک ۲۰۰ سبب بهبود مشخصات بتن تازه و سخت شده شد که این مطلب می تواند به عنوان راه حلی برای مصالح غیر شسته، با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی باشد [۷۴].

۳-۱ مصالح مصرفی در بتن غلتکی

مصالح اساسی مورد استفاده در بتن غلتکی شامل آب، مواد سیمانی (سیمان و پوزولان)، ریزدانه و درشت دانه (ماسه و شن) است. انتخاب مصالح مورد نیاز در ساخت روسازیهای بتن غلتکی، تحت تأثیر عواملی مانند مقاومت طرح، دوام مورد نیاز و نوع کاربری روسازی ساخته شده می باشد [۱۴]. در روند ساخت بتن غلتکی روسازی از فرایند ساخت بتن معمولی بسیار کمکی می گیرند، و فرایند اجرای آن بیشتر از روش های پخش آسفالت استفاده می کنند. تراکم روسازی های بتن غلتکی به وسیله غلتک ها انجام می گیرد و این مرحله از اجرای بتن غلتکی نیز مشابه تراکم روسازی های آسفالتی است. همچنین دانه بندی سنگدانه ها نیز در این دو نوع روسازی نسبتاً مشابه است، با این حال مواد و مصالح و رفتار روسازی بتن غلتکی به روسازی های بتنی معمولی نزدیک تر است. در بتن معمولی حدود ۴۷-۵۰ درصد وزن کل درشت دانه است درحالی که در بتن غلتکی این مقدار به ۳۷-۴۰ درصد محدود می شود در مورد ریزدانه نیز در بتن معمولی حدود ۳۰ - ۳۵ درصد وزن کل ریزدانه است درحالی که در بتن غلتکی روسازی این مقدار به ۴۶ - ۵۰ درصد افزایش می یابد که نشان دهنده اهمیت ریزدانه در این روسازی است [۱۱].

مخلوط های بتن غلتکی باید به اندازه ای خشک باشند که بعد از عملیات بتن ریزی قادر به تحمل وزن یک غلتک لرزان بوده و از طرفی به اندازه ای روان باشد که توزیع یکنواخت خمیر سیمان را تضمین نماید. در شکل ۱-۳ بتن تازه را نشان می دهد که درعین حال که خمیر لازم برای سنگدانه ها را تامین کرده و چسبانندگی مناسبی داشته و بتنی خشک و سفت بوده که دارای روانی درمشت دست ندارد. تعیین اصولی نسبت های اختلاط برای تامین میزان خمیر مورد نیاز برای پوشاندن اطراف سنگدانه ها و پرکردن حفرات مخلوط متراکم شده امری ضروری است. پوشانده شدن سطح سنگدانه ها توسط خمیر برای دستیابی به روسازی مقاوم و با دوام و برای اطمینان از انتقال بار از طریق قفل و بست سنگدانه ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در بحث دوام روسازی های بتن غلتکی که از پارامترهای مهم مورد توجه است. بررسی شبکه حباب هوای مخلوط کمک بسیاری در تشخیص تفاوت روسازی بتن غلتکی در برابر یخبندان می کند [۳].



شکل ۳-۱ : چسبندگی و شل بودن مخلوط تازه

بهترین خصوصیات عملکردی هنگامی حاصل می شوند که پدیده ی جداسازی در مخلوط بتن غلتکی رخ نداده و نیز عملیات تراکم در ضخامت لایه بطور کامل صورت گرفته و منجر به دست یابی به حداکثر چگالی شده است. مقاومت بتن غلتکی روسازی با کاهش چگالی بطور قابل ملاحظه ای افت می کند [۱۱]. در ادامه به خصوصیات موردنیاز برای هر یک از مصالح مذکور پرداخته شده است:

۳-۱-۱ سنگدانه ها :

سنگدانه ها حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد از حجم مخلوط بتن غلتکی روسازی را تشکیل می دهند. در نتیجه تأثیر قابل ملاحظه ای بر خواص بتن سخت شده و بتن تازه دارند. انتخاب سنگدانه مناسب باعث صرفه اقتصادی بیشتر و بهره برداری بهتر از روسازی راه خواهد شد. در فاز بتن تازه، سنگدانه ها بر خصوصیات مانند کارایی، پتانسیل جداسازی و سهولت تراکم تأثیر گذارند و در فاز بتن سخت شده، ویژگی هایی مانند مقاومت، مدول الاستیسیته، خواص حرارتی و دوام متأثر از کیفیت سنگدانه ها می باشد. سنگدانه های مورد استفاده در روسازی های بتن غلتکی شامل ریزدانه (سنگدانه ریزتر از ۴/۷۵ میلیمتر (الک شماره ۴)) و درشت دانه (سنگدانه درشت تر از ۴/۷۵ میلیمتر) است. درشت دانه معمولاً شامل شن شکسته یا طبیعی (رودخانه ای) و یا ترکیبی از آنها است. ریزدانه نیز ممکن است شامل ماسه طبیعی، ماسه شکسته و یا ترکیبی از آن دو باشد [۵]. وجود ذرات بسیار ریز غیر پلاستیک نظیر سیلت در ماسه به عنوان پر کننده سبب کاهش مقدار سیمان مورد نیاز خواهد شد. اما همراه بودن مقدار رس بیش از حد نیاز، آب مورد نیاز مخلوط را بیشتر کرده و در نتیجه مسائل جمع شدگی، ایجاد ترک و کاهش مقاومت را در پی خواهد داشت. شایان ذکر است که در مواردی طبق نظر طراح پروژه که بتن غلتکی با کیفیت پایین تر مورد قبول است، سنگدانه هایی که برخی الزامات استانداردهای اخیر الذکر را ارضا نمی کنند نیز ممکن است برای پروژه قابل قبول باشند. بتن غلتکی حاوی شن طبیعی عموماً مقدار آب کمتری نسبت به بتن

غلطکی حاوی شن شکسته برای رسیدن به یک مقدار روانی مفروض، لازم دارد. بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته به انرژی بیشتری برای تراکم نیاز خواهد داشت و لیکن جداسدگی در آن کمتر اتفاق می افتد. همچنین بتن غلتکی حاوی شن شکسته معمولاً- مقاومت خمشی بیشتری به دست می دهد. اساساً میزان انسجام و چسبندگی مخلوط های بتن غلتکی به اندازه بتن معمولی نیست، لذا مسائل جداسدگی سنگدانه در مورد آن ها، بیشتر حائز اهمیت است. بتن غلتکی حاوی شن طبیعی عموماً مقدار آب کمتری نسبت به بتن غلتکی حاوی شن شکسته برای رسیدن به یک مقدار روانی مورد انتظار، احتیاج دارد. بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته به انرژی بیشتری برای تراکم نیاز خواهد داشت؛ اما جداسدگی در آن کمتر رخ می دهد. همچنین بتن غلتکی حاوی شن شکسته معمولاً مقاومت خمشی بیشتری دارد. میزان انسجام و چسبندگی مخلوط بتن غلتکی به اندازه بتن معمولی نیست؛ در نتیجه جداسدگی سنگدانه در مورد آن ها، از درجه اهمیت بیشتری برخوردار است. استفاده از سنگدانه با اندازه حداکثر اسمی NMSA بزرگتر سبب اقتصادی تر شدن طرح می شود. چرا که با افزایش NMSA میزان فضای خالی بین سنگدانه ها کاهش یافته و در نتیجه مقدار خمیر سیمن کمتر مورد نیاز است. ولی برای یک روسازی با کیفیت و مسطح، مقدار NMSA نباید از ۱۹ میلیمتر تجاوز نماید. اگر سطحی صاف و مسطح در روسازی راه مد نظر باشد، باید درشت دانه و ریزدانه به نحو مناسبی با هم مخلوط شوند و ترکیب دانه بندی مناسبی را ایجاد نمایند [۱۱]. محدود کردن حداکثر اندازه سنگدانه ها به ۱۳ میلیمتر باعث بهبود همواری و صافی سطح و عدم افت شدید مقاومت فشاری و ایجاد خرابی چاله در روسازی بتن غلتکی می شود. هرچقدر دانه های شن ریزتر باشند میزان نرم بودن بتن غلتکی بیشتر شده و به رویه آسفالتی نزدیکتر خواهد شد، همچنین با ریزتر شدن مصالح چسبندگی افزایش یافته و موجب استحکام بیشتری در مقابل جداسدگی دانه های سطحی خواهد شد [۱۲].

۳-۱-۲ مصالح چسبنده

مواد سیمنی مورد استفاده در بتن غلتکی روسازی شامل سیمن پرتلند یا سیمن پرتلند آمیخته و گاهی سیمن به همراه پوزولان یا سربار اضافه شده به صورت مجزا است. انتخاب نوع سیمن بر اساس مقاومت طرح و سنی که برای مقاومت طرح در نظر گرفته شده است، صورت می گیرد. در بسیاری از روسازی های بتن غلتکی ساخته شده تاکنون، از سیمن پرتلند نوع ۱ یا ۲ و خاکستر بادی کلاس F یا C استفاده شده است [۷۵]. سیمن پرتلند نوع II برای روسازی RCC به دلیل ویژگی های تولید حرارت کم در سنین اولیه و زمان های تعیین شده دیگر بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. از سیمن پرتلند نوع ۳ (زود سخت شونده) به دلیل عدم فرصت برای کار با بتن در بتن غلتکی استفاده نشده است. استفاده از خاکستری در بتن غلتکی راهکار مؤثری برای تأمین ذرات ریز مورد نیاز برای تراکم کامل است. در روسازی های بتن غلتکی از مواد چسبنده مختلفی مانند سیمن پرتلند معمولی یا سیمن هیدرولیکی مخلوط شده، سرباره های بدست آمده از کوره ذوب آهن، پوزولان های طبیعی و پوزولان های

مصنوعی (خاکستر بادی) می توان بهره برد. سیمان پرتلند از مخلوط و آسیاب کردن سنگ آهک و خاک رس به نسبت ۱ به ۳ و پختن گرد همگن و یکنواخت زیر دمای ۱۰۰۰ درجه، تا CO_2 از سنگ آهک و آب شیمیایی از خاک رس جدا شوند. در گرمای زیر ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد آهک با سیلیس و رس ترکیب میشود. در گرمای بالای ۱۲۰۰ درجه، رویه ی دانه های گرد داغ شده و ضمن عرق گردن به هم میچسبند و به صورت کلوخ های کلینکر در می آیند. از سرد کردن کلوخ ها و سپس آسیاب کردن آنها با کمی سنگ گچ، سیمان تولید می شود. انتخاب نوع سیمان بر اساس مقاومت طرح و سنی که برای مقاومت طرح در نظر گرفته شده است، صورت میگیرد. در صورت وجود سولفات در خاک بستر میتوان از سیمان ضد سولفات استفاده کرد. سیمان پرتلند مورد استفاده باید الزامات استاندارد ASTM C150 را ارضا نماید. از سیمان پرتلند نوع III (زود سخت شونده) به دلیل عدم فرصت کافی برای کار با بتن در بتن غلتکی استفاده نمی شود [۷۶]. از پوزولان ها به منظور کاهش حرارت تولید شده در بتن استفاده می شود. اگر دسترسی به پوزولان راحت و امکان پذیر باشد میتوان از آن به عنوان بخشی از ریز دانه ها که در جهت کاهش فضای خالی بین سنگدانه ای مناسب است استفاده کرد. در صورتیکه به عنوان مصالح چسبنده از پوزولان استفاده شود، به صورت درصدی از وزن سیمان، جایگزین آن در طرح اختلاط می شود. خاکستر بادی که از آن به عنوان پوزولان مصنوعی نام برده می شود، دوده حاصل از سوخت ذغالسنگ پودر شده در نیروگاه های حرارتی می باشد که به دلیل جلوگیری از آلودگی های زیست محیطی در فیلترهای نصب شده به مقدار بسیار زیاد جمع آوری می گردد [۷۷].

۳-۱-۳ آب

کیفیت و الزامات آب مورد استفاده در بتن غلتکی روسازی مشابه آب مصرفی برای بتن معمولی است. آنچه که باید در نظر داشت این است که در طرح اختلاط روسازی های بتن غلتکی، میزان آب بکار رفته باید در محدوده مربوط به کارآیی پایین (اسلامپ صفر) قرار گیرد. بر این اساس بهتر است تا مطابق با استاندارد ASTM D 558، طرح اختلاط بتن غلتکی به جای یک ترکیب بتنی بصورت ترکیب خاک-سیمان مورد بررسی قرار گیرد و از این طریق برای نیروی تراکم مشخص، رابطه ای بین میزان رطوبت طرح اختلاط و دانسیته آن برقرار گردد [۷۸].

۳-۱-۴ افزودنی ها

مواد افزودنی که در طرح اختلاط بتن غلتکی مورد استفاده قرار می گیرند به دو گروه تقسیم می شوند:

۱- افزودنی های هوازا ۲- افزودنی های شیمیایی

برای جلوگیری از خرابی ناشی از یخ زدگی در بتن، استفاده از مواد هوازا در مخلوط بتن امری مرسوم است. تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در اداره مهندسين ارتش ایالات متحده آمریکا نشان داده است که در روسازی

های بتن غلتکی به خوبی میتوان از مواد هوزا به میزان ۵ تا ۱۰ برابر بیش از مقداری که برای بتن معمولی بکار می رود، جهت ایجاد هوزایی مورد نظر در بتن استفاده نمود. افزودنی های شیمیایی مانند روان کننده ها و کندگیرکننده ها کاربردهای محدودی در بتن غلتکی داشته اند و عموماً در تحقیقات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته اند. تأثیر این مواد در ارتقاء خواص بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی کمتر است؛ چرا که این مواد، مقدار خمیر سیمان را تحت تأثیر قرار می دهند و در بتن غلتکی مقدار خمیر سیمان نسبت به بتن معمولی کمتر است [۷۳].

۳-۲ تعیین نسبت های طرح اختلاط

تعیین نسبت مخلوط های بتن که به تعیین نسبت های اختلاط یا طرح اختلاط بتن نیز مرسوم است روندی است که توسط آن می توان به ترکیب درست سیمان، سنگدانه ها، آب و مواد افزودنی برای ساخت بتن طبق مشخصات داده شده رسید. یکی از اهداف تعیین نسبت اختلاط، به دست آوردن محصولی است که عملکردی مطابق با نیاز های از پیش تعیین شده داشته باشد. مهمترین این نیازها، کارایی بتن و مقاومت بتن سخت شده در سن مشخص می باشد. هدف دیگر تعیین نسبت اختلاط، به دست آوردن مخلوط بتنی است که نیاز های عملکردی را با کمترین هزینه ممکن تامین کند و این شامل تصمیم گیری در مورد مصالحی است که نه تنها مناسب اند، بلکه قیمت قابل قبولی نیز دارند. بنابراین هدف کلی تعیین نسبت مخلوط های بتن را می توان خلاصه کرد به انتخاب مصالح مناسب از میان مصالح موجود، و تعیین مقرون به صرفه ترین ترکیبی که بتن بتواند با حداقل خواص معین تولید گردد. در صورت نیاز به نسبت آب به سیمان کمتر باید دقت داشت که استفاده بیش از حد از سیمان موجب افزایش مقاومت نمی شود دلیل آن احتمالاً ناهماهنگی ذاتی خمیر سیمان پرتلند هیدراته شده و وجود بلورهای بزرگ هیدروکسید کلسیم است که سبب ضعیف شدن قسمت هایی از بتن تحت تنش می شود. بنابراین قسمت های ناهمگن و ضعیف در ناحیه انتقال به دلیل وجود ترک های مویی حتی قبل از اعمال بار خارجی نیز آسیب پذیرند. باید توجه داشت که افزایش مقدار سیمان به معنی افزایش هزینه، حرارت هیدراتاسیون و جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن است روش های طرح اختلاط بتن غلتکی بدلیل سفت تر بودن مخلوط و نیز دانه بندی متمایز آن، با روش های بکار رفته برای بتن های معمولی متفاوت است. تفاوت های اصلی در روسازی های بتن غلتکی راه با روسازی های بتنی معمولی عبارت است از:

۱- بتن غلتکی عموماً هوزایی نمی شود.

۲- بتن غلتکی مقدار آب کمتری دارد.

۳- بتن غلتکی مقدار خمیر سیمان کمتری دارد.

۴- بتن غلتکی به مقدار ریزدانه بیشتری برای دستیابی به دانه بندی مناسب و برای عملکرد مناسب تحت تراکم با غلتک ارتعاشی، نیاز دارد.

آیین نامه انجمن بتن آمریکا برای ساخت این نوع بتن دو روش را ذکر کرده است. روش اول مبتنی بر اصول تراکم خاک است، این روش شامل استفاده از منحنی درصد رطوبت- چگالی بتن غلتکی تازه با استفاده از آزمایش تراکم اصلاح شده خاک است. این روش جهت تعیین میزان رطوبت بهینه در عیار ثابتی از سیمانی می باشد. سپس با تغییر عیار سیمانی و ساخت نمونه های آزمایشی طرح اختلاط بهینه با در نظر داشتن الزامات مقاومت و دوام طرح انتخاب می شود [۱]. روش دوم نیز روش مبتنی بر کارایی بتن است. در این روش تعدادی مخلوط آزمایشی با تغییر مقادیر نسبت آب به مواد سیمانی و نسبت ماسه به مواد سیمانی متناظر جهت دستیابی به مقاومت مورد نظر انتخاب می گردد. پس از تعیین این نسبت ها، نسبت سنگدانه های درشت به ریز (شن و ماسه) با توجه به قوام مورد نظر انتخاب می شود به نحوی که مخلوط ساخته شده ملاحظات دوام و کارایی مورد نظر را تامین کند.

این روش ها را میتوان به دو دسته کلی زیر تقسیم نمود:

۱- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش های روانی بتن (روش بتنی)

۲- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش های تراکم خاک (روش خاکی)

دیدگاه بتنی برای انتخاب طرح اختلاط بتن غلتکی مربوط به سدهای بتن غلتکی با بیشینه قطر اسمی سنگدانه های ۳۸ میلی متر کاربرد دارد. دیدگاه خاکی برای تعیین آن دسته از طرح اختلاط های که بیشینه قطر اسمی سنگدانه های آنها از ۱۹ میلیمتر کمتر می باشد، به خصوص روسازی ها کاربرد دارد. روش کار هر دو دیدگاه به طور خلاصه در زیر شرح داده شده است.

۳-۲-۱ دیدگاه بتنی

روش رسیدن به طرح اختلاط مورد نظر در این دیدگاه بر اساس کارایی بهینه بتن غلتکی می باشد. در این دیدگاه هدف دستیابی به طرح اختلاطی با کارایی بهینه، در مقاومت مورد نظر می باشد. برای دستیابی به این منظور از دستگاه وی بی اصلاح شده که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، استفاده می شود. این وسیله از سه بخش اصلی تشکیل شده است [۳].

۱- میز لرزان که دارای دامنه و فرکانس ثابت میباشد،

۲ - ظرف استوانه ای با حجم تقریبی ۰/۰۰۹۴ مترمکعب که به راحتی روی میز لرزان سوار می شود،

۳ - وزن سربار ۱۳/۳ تا ۲۲/۷ کیلوگرمی.



شکل ۳-۲: دستگاه وی بی اصلاح شده [۳]

طرز کار دستگاه بدین گونه است که مخلوط بتن غلتکی آماده شده را در داخل ظرف استوانه ای ریخته و وزنه سربار را روی آن قرار می دهند. با شروع به کار میز لرزان، کارایی، برحسب زمان مشاهده حلقه کاملی از شیره بتن بین وزنه سربار و دیواره ظرف استوانه های بیان میشود. در کل زمان وی بی اصلاح شده، برای طرح اختلاط های بتن غلتکی، تحت تأثیر عواملی نظیر میزان آب، بیشینه قطر اسمی سنگدانه ها، مقدار ریزدانه ها و همچنین سنگدانه های ریزتر از الک شماره ۲۰۰ می باشد [۷۳]. در تمام روش های بتنی جهت رسیدن به مقاومت فشاری طرح، نسبت آب به مواد سیمانی مدنظر قرار می گیرد و اجزاء مخلوط به گونه ای تعیین می شوند که کارایی مخلوط جهت تراکم با غلتک و برهای 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 اصلاح شده) تعیین می گردد. آزمایش تعیین زمان وی بی اصلاح شده شامل کاربرد تجهیزات استاندارد وی بی با فرکانس ۳۶۰۰ دور در دقیقه می باشد. مخلوط بتن غلتکی را در ظرف استوانه ای استاندارد به حجم ۹ لیتر ریخته و سپس سربار به وزن ۲۲/۷ کیلوگرم (طبق استاندارد ASTM C1176) روی آن قرار داده می شود و ارتعاش آغاز می گردد [۵]. مدت زمان ارتعاش لازم تحت سربار جهت دستیابی به تراکم مطلوب، تحت تأثیر پارامترهایی مانند مقدار آب، دانه بندی سنگدانه، اندازه حداکثر سنگدانه، مقدار ماسه و مقدار ذرات ریزتر از ۷۵ میکرومتر (الک شماره ۲۰۰) است. تحقیقات آزمایشگاهی با سربار ۲۲/۷ کیلوگرم، زمان وی بی اصلاح شده ۳۰ تا ۵۵ ثانیه را برای مخلوط بتن غلتکی روسازی مناسب نشان داده است. پس از تعیین زمان وی بی اصلاح شده برای یک مخلوط بتن غلتکی، باید این مقدار با نتایج آزمایشات تراکم کارگاهی مقایسه شده و در صورت نیاز اصلاحات لازم در نسبت های اجزای بتن صورت پذیرد. در روش های طرح اختلاط با استفاده از آزمایش روانی، همه پارامترهای مخلوط به غیر از یکی از آن ها مانند مقدار آب، مواد سیمانی یا مقدار سنگدانه، ثابت نگه داشته شده و با انجام آزمایش های لازم، مقدار ماده متغیر تعیین میگردد تا روانی مناسب و سایر خواص مورد نظر حاصل شود. به این صورت مقدار بهینه هر یک از اجزای بتن به منظور دستیابی به خواص مورد نظر بتن غلتکی تازه و سخت شده، حاصل می شود. میزان

مصالح چسبنده بکار رفته در طرح اختلاط به مقاومت ویژه چسبندگی بین لایه‌ها و ملاحظات حرارتی بستگی دارد. طرح اختلاط زمانی بیشترین مقدار مقاومت خود را بدست می‌آورد که میزان ملات سیمان بکار رفته در آن درست به اندازه لازم برای پر کردن فضاهای خالی بین سنگدانه ای باشد. برای تعیین نسبت آب به سیمان مورد نیاز برای یک مقاومت مشخص، از آزمایش مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استفاده می‌شود. در این روش، ملات ماسه سیمان به منظور دستیابی به مقاومت مورد نظر آماده شده و سپس با تغییر درصد ملات و درشت دانه میتوان آنها را تا رسیدن به کارایی مورد نظر، مطابق با زمان وی بی نسبت بندی کرد. از این طریق میزان ملات ماسه سیمان مورد نیاز در واحد حجم تعیین می‌شود. در دیدگاه بتنی، سنگدانه های ریز و درشت بایستی طوری با هم مخلوط شوند که ملات سیمان مورد نظر فضای خالی ما بین سنگدانه ها را پرکند؛ در این صورت بیشترین دانسیته به ازای ملات ماسه سیمان مشخص به دست آید. برای این منظور ریزدانه ها در هر مرحله با مقدار افزایش یکسان به ملات سیمانی که دارای نسبت آب به مصالح چسبنده مشخص میباشد، افزوده شده و سپس دانسیته نمونه ها با روشی مشابه با آنچه که در ASTM D1557 آمده، یا با استفاده از روش لرزش طولانی مدت تعیین می‌شود. در ادامه دانسیته اندازه گیری شده به ازای حجم ملات سیمان استفاده شده، رسم شده و از روی آن حجم ملات سیمانی که بیشترین دانسیته را برای ملات ماسه سیمان مورد نظر ایجاد می‌کند، انتخاب می‌شود.

۳-۲-۱-۱ تعیین طرح اختلاط با دیدگاه بتنی

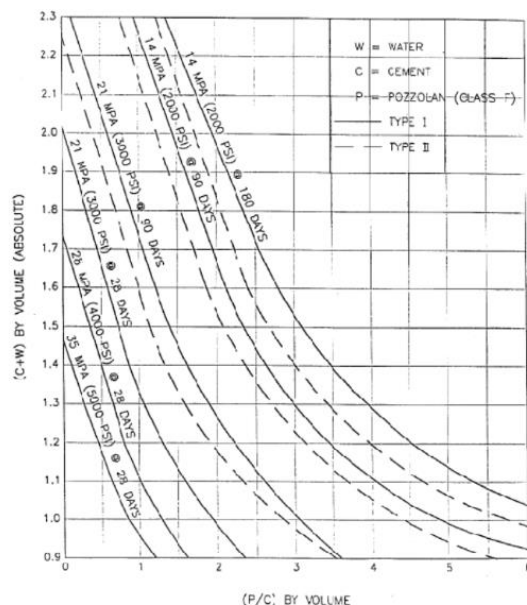
روش روانی یا کارپذیری بر اساس استاندارد ACI 211. 3R تدوین شده است. این روش برای تعیین نسبتهای طرح اختلاط بتن غلتکی با بزرگترین اندازه اسمی دانه ۳۷/۵ میلیمتر کاربرد دارد. در این روش معیار تعیین کارپذیری و روانی بهینه، انجام آزمایش و به اصلاح شده می‌باشد. مطابق پیشنهاد استاندارد زمان وی بی مناسب برای تحکیم، زمان بین ۲۳ تا ۳۳ ثانیه می‌باشد [۷۳]. در این روش تعدادی مخلوط آزمایشی با تغییر مقادیر نسبت آب به مواد سیمانی و نسبت ماسه به مواد سیمانی ساخته شده و نمونه سازی انجام می‌گیرد. سپس مقاومت و دوام هر مخلوط اندازه گیری می‌شود. سپس با توجه به نتایج بدست آمده مقدار آب به مواد سیمانی و مقدار ماسه به مواد سیمانی متناظر جهت دستیابی به مقاومت مورد نظر انتخاب می‌گردد. روش آزمون مذکور در استاندارد ACI تحت عنوان "طرح اختلاط برای بتن های بدون اسلامپ" آورده شده است. روش های طرح اختلاطی که از آزمایش قوام بتن استفاده می‌کنند، معمولاً پارامترهای ویژه و ثابتی برای مخلوط لازم دارند. از جمله ای پارامترها می‌توان به مقدار آب، مقدار مصالح سیمانی یا مقدار سنگدانه اشاره کرد.

۳-۲-۱-۲ مراحل گام به گام روش طرح اختلاط برپایه کارایی بهینه بتن :

- ۱- انتخاب نسبت حجمی پوزولان به سیمان ۲- تعیین حداقل حجم خمیر سیمان ۳- تعیین حجم درشت دانه
- ۴- تعیین حجم هوای مخلوط ۵- محاسبه حجم خمیر بدون هوا ۶- تعیین حجم ریزدانه ۷- تعیین حجم آب

آزمایشی ۸- محاسبه حجم سیمان ۹- تعیین حجم پوزولان ۱۰- محاسبه وزن مصالح ۱۱- انجام آزمایش روانی بتن ۱۲- تعیین طرح نهایی و سنجش مقاومت فشاری [۳].

۱- نسبت های حجمی پوزولان به سیمان و آب به مواد سیمانی با توجه به الزامات طرح و به کمک نمودار های موجود برای ملات و بتن انتخاب می گردد.



شکل ۳-۳: رابطه بین مقاومت فشاری و نسبت آب به مواد سیمانی، به ازای مقادیر مختلف پوزولان به مواد سیمانی [۷۳]

۲- حداقل حجم خمیر مطابق روش زیر تعیین می شود:

الف- از درصد آب به مواد خشک تعیین شده در طرح اختلاط جهت ساخت خمیر سیمان استفاده می گردد و نمونه های ملات با مقادیر مختلف مقدار ریزدانه ساخته میشوند. سپس چگالی نمونه های ملات را که با روش های تراکم خاک ها مانند ASTM D1557 و یا ویبره ساخته شده اند، اندازه گرفته می شود.

ب- نمودار چگالی ملات به ازای حجم های مختلف خمیر رسم می گردد.

ج- حجم خمیر ملاتی که بیشترین چگالی را دارد تعیین میگردد. این مقدار حجم خمیر، به عنوان نسبتی از کل حجم ملات، باید به میزان ۵ تا ۱۰ درصد در طراحی مخلوط بتن غلتکی افزایش داده شود. در صورت عدم انجام آزمایش های مورد اشاره در فوق، پیشنهاد می شود نسبت حجم بدون هوای ملات سیمان به حجم بدون هوای ملات ماسه سیمان در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۴۶ انتخاب شود.

۳- تعیین حجم درشت دانه

مقدار درشت دانه باید به گونه ای باشد که ضمن به حداقل رساندن مقدار ملات لازم در مخلوط، امکان تراکم مناسب و پرشدن منافذ خالی آن توسط ملات را فراهم آورد. فضای خالی بین ذرات درشت دانه و در نتیجه حجم خمیر لازم در بتن غلتکی بستگی به دانه بندی، شکل و اندازه حداکثر درشت دانه دارد. لذا بهتر است که دانه بندی درشت دانه به سمت تراکم حداکثر تنظیم شود. در انتخاب مقدار مناسب درشت دانه، روش توصیه شده به این شکل است که نسبت های مختلف حجمی درشت دانه و ملات با هم ادغام شده و زمان وی بی اصلاح شده بتن غلتکی حاصله اندازه گیری می گردد. نسبت های اجزای ملات یا به عبارتی طرح اختلاط ملات در تمام مخلوط ها ثابت نگه داشته می شود و تنها حجم ملات نسبت به واحد حجم بتن تغییر داده می شود. مقدار مناسب درشت دانه مقداری است که مخلوطی با زمان وی بی مورد نظر پروژه بدست دهد. در جدول ۱-۳ برای اندازه حداکثرهای مختلف درشت دانه، محدوده های درصد های حجمی ارائه شده اند که به عنوان نقطه شروع می تواند در تعیین مقدار بهینه درشت دانه مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱-۳ : درصد حجمی درشت دانه در واحد حجم بتن [۷۳]

اندازه حداکثر سنگدانه	۹/۵ میلی متر	۱۹ میلی متر	۳۸ میلی متر	۷۶ میلی متر	۱۱۴ میلی متر	۱۵۲ میلی متر
حجم مطلق درشت دانه (درصد)	۴۸-۴۲	۵۲-۴۶	۵۶-۵۲	۶۱-۵۷	۶۳-۶۱	۶۴-۶۳

۴- مقدار هوای داخل بتن بین ۱ تا ۲ درصد حجم کل بتن در نظر گرفته می شود و مقدار حجم هوای داخل مخلوط بتن با فرمول زیر محاسبه می شود :

$$\text{حجم بتن} \times (100 \div \text{مقدار هوا}) = \text{حجم هوا}$$

۵- محاسبه حجم خمیرسیمان :

حجم هوای داخل مخلوط - (حجم کل ملات $\times (100 \div \text{مقدار حداقل خمیر مواد سیمانی})$) = حجم خمیرسیمان درملات

$$\text{حجم درشت دانه} - \text{حجم بتن} = \text{حجم کل ملات}$$

۶- تعیین حجم ریزدانه :

$$\text{حجم هوا} - \text{حجم درشت دانه} - \text{حجم بتن} = \text{حجم ریزدانه}$$

۷- تعیین حجم آب :

$$(۱ + \text{نسبت آب به مواد سیمانی}) \div (\text{حجم خمیر بدون هوا} \times (\text{نسبت آب به مواد سیمانی})) = \text{حجم آب}$$

۸- تعیین حجم سیمان :

$$((۱ + \text{نسبت حجمی پوزولان به سیمان}) \times (\text{نسبت آب به مواد سیمانی})) \div (\text{حجم آب}) = \text{حجم سیمان}$$

۹- محاسبه حجم پوزولان :

$$(\text{نسبت حجمی پوزولان به سیمان}) \times \text{حجم سیمان} = \text{حجم پوزولان}$$

۱۰- محاسبه جرم مصالح با ضرب نمودن حجم آنها در جرم حجمی هر یک

۱۱- انجام آزمایش های روانی برای دستیابی به زمان وی بی اصلاح شده موردنظر

۱۲- بعد از انتخاب نهایی حجم سنگدانه ها لازم است حداقل دواختلاط آزمایشی یکی با نسبت آب به مواد خشک بیشتر و یکی هم با نسبت کمتر از مقدار تعیین شده ساخته شود. آنگاه نمودار مقاومت به ازای این نسبت را رسم کرده و نسبت های نهایی اختلاط تعیین می گردد[۳].

۳-۲-۲ طرح اختلاط با استفاده از دیدگاه خاکی

دومین روش طرح اختلاط بتن غلتکی روشی است که براساس روش معمول درآزمایشات خاک یعنی روش تراکم خاک استوار است. تجهیزات و میزان انرژی لازم برای تراکم و تهیه نمونه های آزمایش رطوبت -چگالی دراستاندارد ASTM D1557 شرح داده شده است. مطابق این دستورالعمل ها، در ابتدا ، نسبت های سنگدانه های خشک به گونه ای انتخاب شدند تا منحنی سنگدانه های ترکیبی خوب دانه بندی شده ایجاد شود. مقدارمواد سیمانی براساس الزامات مقاومت و دوام مورد نظر در روسازی تعیین می شود و غالبا بصورت درصدی از جرم کل مصالح خشک بیان می گردد. مقدارمواد سیمانی بین ۱۰ تا ۱۷ درصد جرم کل مصالح خشک در مخلوط های بتن غلتکی روسازی تغییر می کند. این مقدار برابر با ۲۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۳۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب می شود. ریزدانه و درشت دانه چنانکه قبلا شرح داده شده به نحوی انتخاب می شود که ترکیبی با دانه بندی مناسب ایجاد کنند. مقدار حجم ریزدانه و درشت دانه در واحد حجم بتن غلتکی پس از محاسبه مقدار رطوبت بهینه تعیین می شود. مقدار بهینه رطوبت مخلوط مقدار متناظر با نقطه پیک منحنی رطوبت- چگالی است که بستگی به خواص سنگدانه های مصرفی و مقدار موادسیمانی دارد. در مخلوطی که مقدار رطوبت آن کمتر از مقدار بهینه است به دلیل ایجاد فضای خالی بین سنگدانه ها مقاومت کاهش پیدا می کند. همچنین در صورتیکه مقدار رطوبت بیشتر

از مقدار بهینه باشد نیز به دلیل افزایش نسبت آب به موادسیمانی مقاومت کاهش پیدا می کند. معمولاً چند منحنی رطوبت-چگالی به ازای مقادیر مختلف مواد سیمانی رسم می شود و از بین آن ها مقدار حداقل موادسیمانی به نحوی انتخاب می گردد که الزامات طرح را برآورده کند [۳].

۳-۲-۱ مراحل گام به گام روش طرح اختلال برپایه دیدگاه خاکی

گام اول: درشت دانه و ریزدانه خشک را با یکدیگر ترکیب کرده تا دانه بندی مدنظر بدست آید.

گام دوم: براساس مقاومت خمشی و فشاری مورد نیاز مقدار موادسیمانی انتخاب می شود. برای بتن غلتکی روسازی که مقاومت خمشی بین ۴ تا ۵ مگاپاسکال لازم داشته باشد مقدار موادسیمانی معمولاً ۱۲ تا ۱۶ درصد وزن سنگدانه خشک است.

گام سوم: مطابق روش ذکر شده در استاندارد ASTM D1557 با استفاده از مقادیر تعیین شده سنگدانه و موادسیمانی مقدار رطوبت بهینه محاسبه می شود. برای آزمایش چگالی-رطوبت لازم است حداقل چهار نمونه با مقادیر مختلف آب ساخته شود. سپس منحنی چگالی به ازای رطوبت های مختلف رسم شده و نقطه پیک منحنی به عنوان نقطه دارای رطوبت بهینه تعیین می گردد.

گام چهارم: مقدار هوای داخل بتن ۲ درصد فرض می گردد.

گام پنجم: با استفاده از مقادیر رطوبت بهینه موادسیمانی انتخاب شده و مقدار هوا حجم های مطلق، وزن مصالح برای واحد حجم بتن محاسبه می شوند.

گام ششم: گام های ۲ تا ۵ را با استفاده از مقادیر بالاتر و پایینتر مواد سیمانی تکرار شده و بعد از آماده سازی مخلوط های آزمایشی منحنی مقاومت به ازای مقادیر مختلف سیمانی رسم شده و مقادیر نهایی نسبت های اختلاط تعیین می گردد. سپس گام های ۲ تا ۵ با مقدار انتخاب شده مواد سیمانی تکرار شده و مقدار رطوبت بهینه تعیین که نقطه ماکزیمم نمودار هست تعیین می شود، سپس براساس این رطوبت مشخصات مخلوط نهایی و حجم های مطلق و وزن مصالح برای مخلوط نهایی محاسبه می گردد [۳].

۳-۲-۳ High Paste روش

این روش طرح اختلاط توسط سازمان آبادسازی ایالات متحده آمریکا (U. S. Bureau of Reclamation) تدوین شده است. بتن غلتکی تولید شده توسط این روش عموماً درصد مواد سیمانی و پوزولانی بالا با دانه بندی متوسط و کارپذیری بالا دارد. هدف این روش تولید بتن غلتکی با نفوذپذیری بسیار پایین میباشد که این ویژگی با استفاده

از میزان بهینه مواد سیمانی امکان پذیر است. مقدار آب مصرفی، ریزدانه و درشت دانه بر اساس ارزیابی زمان وبه اصلاح یافته در محدوده ۱۰ تا ۳۰ ثانیه با انجام آزمایش وبه اصلاح یافته ASTM C1176 بر روی مخلوط های بتنی آزمایشی تعیین می گردد [۷۹].

۳-۲-۴ روش عددی (مدل اجسام معلق) (Solid Suspension Modal)

در سالهای اخیر، یک روش تئوری و عددی برای طراحی نسبت های اختلاط بتن غلتکی تحت نام شد. این روش بر پایه بهینه سازی چگالی خشک مخلوط های بتن غلتکی، برای تعیین نسبت های هر یک از مصالح خشک (سیمان، خاکستر بادی، میکروسیلیس، ماسه و درشت دانه) می باشد. با استفاده از روش بهینه سازی چگالی خشک، مقدار آب لازم برای پوشاندن فضای خالی بین مصالح خشک محاسبه می شود. با در دست داشتن مشخصات مصالح موجود (دانه بندی، وزن مخصوص و درصدها)، میتوان با استفاده از یک شبیه ساز کامپیوتری مدل اجسام معلق را برای طرح اختلاط بتن غلتکی مدل سازی کرد. مزیت اصلی مدل اجسام معلق، سرعت در محاسبات و بهینه سازی نسبت های اختلاط میباشد. در عین حال، نیازی بوه انجام تعداد زیادی آزمایشات آزمایشگاهی نمی باشد [۷۹].

۳-۳ اصول طراحی :

۱- ترکیبی خشک به وزن ۹ کیلوگرم از درشت دانه ها و ریزدانه ها، مطابق با محدوده دانه بندی اشاره شده، برای هر کدام از نمونه های مربوط به تعیین رطوبت بهینه انتخاب می شوند.

۲- بر اساس مقاومت خمشی و فشاری مورد نیاز، مقدار مواد سیمانی (c+p) انتخاب میشود. برای روسازی بتن غلتکی که مقاومت خمشی بین ۴ تا ۵ مگاپاسکال اندازه گیری شده مطابق (۷۵) ASTM C78 لازم داشته باشد، مقدار c+p بین ۱۲ تا ۱۶ درصد وزن سنگدانه خشک متغیر است.

۳- مطابق روش D ذکر شده در استاندارد (۷۲) ASTM D1557 با استفاده از مقادیر تعیین شده سنگدانه و مواد سیمانی مقدار رطوبت بهینه محاسبه می شود. برای آزمایش چگالی- رطوبت لازم است حداقل چهار نمونه مخلوط با مقادیر مختلف آب ساخته شود. سپس منحنی چگالی به ازای رطوبت های مختلف رسم شده و نقطه ماکزیمم منحنی به عنوان نقطه دارای رطوبت بهینه تعیین گردد.

۴- مقدار هوای داخل بتن، ۲درصد فرض می گردد (مقدار واقعی می تواند از نتایج آزمایش تراکم و منحنی فضای خالی صفر بدست آید).

۵- با استفاده از مقادیر رطوبت بهینه، مواد سیمانی انتخاب شده و مقدار هوا، حجم های مطلق و وزن مصالح برای واحد حجم بتن محاسبه می شوند.

۶- گام های ۲ تا ۵ را با استفاده از مقادیر بالاتر و پایین تر مواد سیمانی تکرار شده و بعد از آماده سازی مخلوط های آزمایشی، منحنی مقاومت به ازای مقادیر مواد سیمانی رسم شده و مقادیر نهایی نسبت های اختلاط تعیین می گردد.

سپس گام های ۲ تا ۵ را با مقدار انتخاب شده مواد سیمانی تکرار شده و مقدار رطوبت بهینه تعیین می شود و حجم های مطلق و وزن مصالح دوباره محاسبه می گردد [۱].

فصل ۴

طرح اختلاط نمونه ها و نحوه ساخت

پس از بررسی خصوصیات و ملزومات مصالح مصرفی در روسازی های بتن غلتکی و همچنین روش های طرح اختلاط آن، در این فصل ویژگی های مصالح و طرح اختلاط استفاده شده در این تحقیق مشخص گردیده است. در انتهای فصل نیز نحوه ی ساخت نمونه های مختلف مورد آزمایش در این تحقیق توضیح داده شده است.

۴-۱ مشخصات مصالح مصرفی

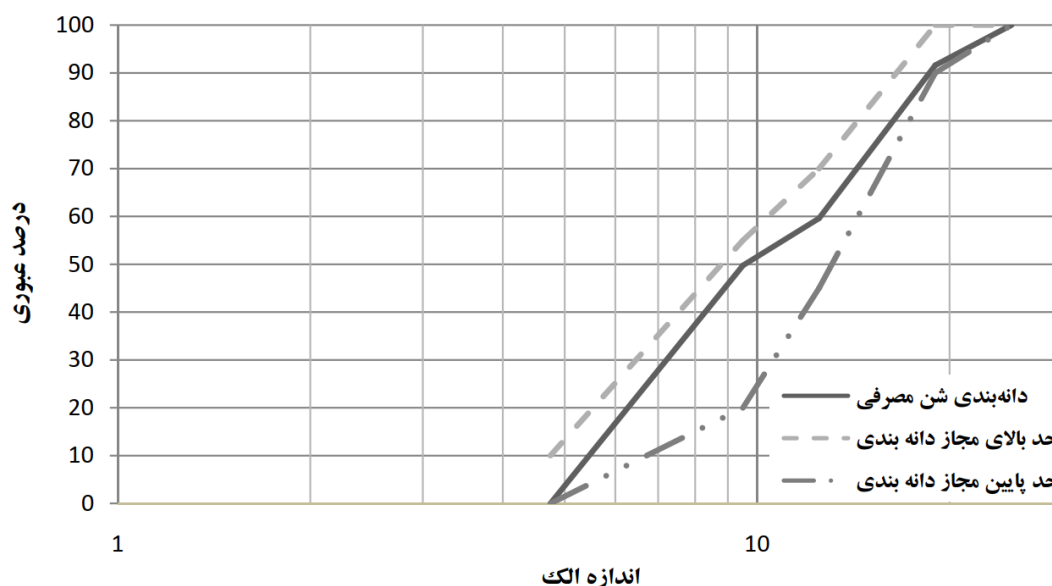
۱- سنگدانه ها (شامل هر دو گروه درشت دانه و ریز دانه)

۲- مصالح چسبنده (شامل سیمان و پوزولان)

۳- آب

۴-۱-۱ درشت دانه

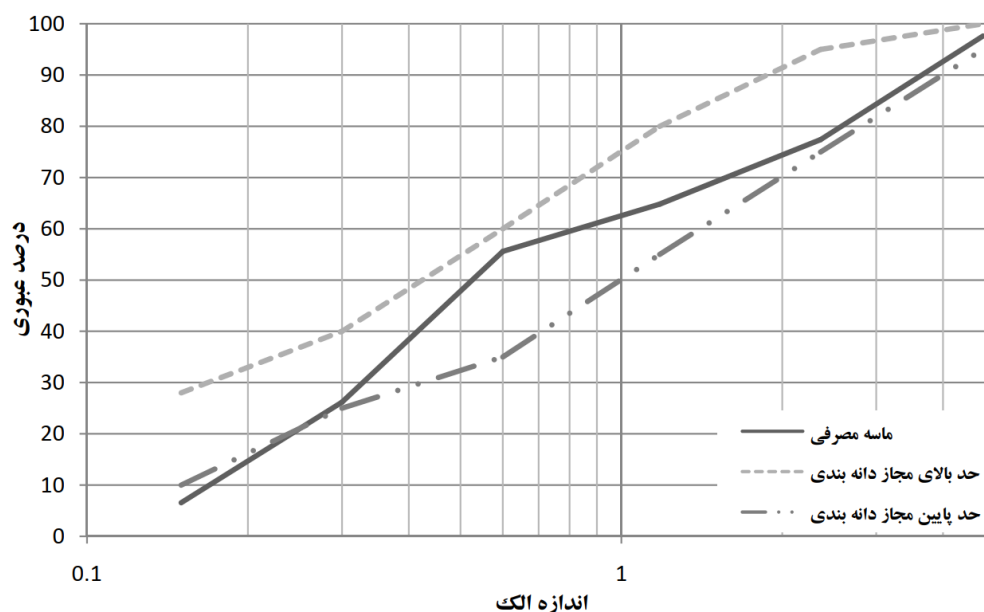
درشت دانه استفاده شده در این تحقیق از نوع شکسته می باشد که از معادن اطراف شاهرود تهیه شده است. بزرگترین قطر اسمی درشت دانه ی استفاده شده ۱۹ میلی متر می باشد که علاوه بر رعایت توصیه ی آیین نامه ACI211.3R [۷۳] نتایج دانه بندی شن مصرفی مطابق با ASTM C33 در نمودار منحنی دانه بندی شن، شکل ۴-۱ نشان داده شده است [۸۰]. وزن مخصوص و جذب آب شن بادامی مطابق ASTM C127-88 بترتیب برابر با ۲/۶۷۵ گرم بر سانتی مترمکعب و ۰/۷۲ درصد بدست آمد. وزن مخصوص و جذب آب شن نخودی مطابق ASTM C127-88 بترتیب برابر با ۲/۶۸۶ گرم بر سانتی مترمکعب و ۰/۶۹ درصد بدست آمد.



شکل ۴-۱ : نمودار دانه بندی درشت دانه

۲-۱-۴ ریزدانه

در این تحقیق از ماسه طبیعی به عنوان ریزدانه استفاده شده است. نتایج دانه بندی ماسه مطابق با ASTM C33 در این منحنی دانه بندی شکل ۲-۴ نشان داده شده است [۸۰]. وزن مخصوص و جذب آب ماسه مطابق ASTM C128-88 بترتیب برابر با ۲/۶۳۰ گرم بر سانتی مترمکعب و ۱/۸ درصد بدست آمد.



شکل ۲-۴: نمودار دانه بندی ریزدانه

۳-۱-۴ مصالح چسبنده (سیمان)

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده است. مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی سیمان مذکور مطابق استاندارد ملی ایران در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۱: مشخصات سیمان استفاده شده در پژوهش

 Shahroud Cement Company QUALITY CONTROL REPORT ShCC-QF28/99.04													
PORTLAND CEMENT TYPE 2													
PHYSICAL SPECIFICATION							CHEMICAL SPECIFICATION						
NO.	Test	Result	Factory standard	ISIRI 389	Test Method		NO.	Component	Result (%)	Factory standard	ISIRI 389	Test Method	
1	Fineness by Blaine (cm ² /gr)	3155	Min 2900	Min 2800	390		1	SiO ₂	21.11	Min 20.5	Min 20		
2	Autoclave expansion	0.048	Max 0.6	Max 0.8	391		2	Al ₂ O ₃	4.48	Max 5	Max 6		
3	Setting time						3	Fe ₂ O ₃	3.91	Max 5	Max 6		
3-1	Initial Time (min)	135	Min 70	Min 45	392		4	CaO	63.36	-	-		1692
3-2	Final time (hr)	3:20	Max 5	Max 6	392		5	MgO	1.37	Max 2.5	Max 5		
4	Compressive Strength (Kg/cm ²)						6	SO ₃	2.58	Max 2.9	Max 3		
4-1	1 Day	-	-	-	393		7	Na ₂ O	0.43	-	-		1695
4-2	2 Day	-	-	-	393		8	K ₂ O	0.48	-	-		
4-3	3 Days	240	Min 170	Min 100	393		9	L.O.I	2.42	Max 2.9	Max 3		
4-4	7 Days	340	Min 250	Min 175	393		10	IR	0.41	Max 0.7	Max 0.75		
4-5	28 Days	435	Min 350	Min 315	393		11	F.CaO	1.23	-	-		1692
5	Heat of hydration (cal/gr)						12	C ₃ S	52.8	-	-		
5-1	3 Days	-	-	-	394		13	C ₂ S	21.0	-	-		
5-2	28 Day	-	-	-	394		14	C ₃ A≤8	5.3	-	-		







۴-۱-۴ سرباره:

در صنایع آهن دو نوع سرباره شامل سرباره کوره بلند و سرباره فولادسازی وجود دارد. سرباره کوره بلند ترکیبی است غیرفلزی که دارای سیلیکات و آلومینوسیلیکات های کلسیم و سایر عناصر بازی است. این سرباره ترکیبی نسبتاً یکنواخت داشته و بصورت دانه ای یا کلوخه ای می باشد. سرباره ای که به آهستگی سرد شده باشد، بلوری می شود و برای ساختن سیمان مناسب نیست؛ ولی اگر سرباره را به وسیله جریان آب با فشار زیاد سرد نمایند به صورت سرباره دانه ای تبدیل می شوند و حالت شیشه ای پیدا می کنند و از نظر شیمیایی در ترکیب با اجزای سیمان به صورت فعال در می آیند. واکنش آب با سرباره دانه ای که نرمی آن به اندازه ذرات سیمان باشد، بسیار ضعیف است و به سختی می توان آن را به عنوان یک اتصال دهنده هیدرولیکی مستقل در نظر گرفت، ولی

با افزودن فعال کننده ای مثل هیدروکسید کلسیم میل ترکیبی سرباره با آب زیاد می شود. در این حالت واکنش های ترکیبی همانند سیمان پرتلند می باشد و تنها تفاوتش این است که واکنش با سرعت کمتری صورت می پذیرد. سرباره مصرفی در این پژوهش سرباره کوره قوس الکتریکی از کارخانه ذوب آهن اصفهان گرفته شده است. جدول ۲-۴ مشخصات سرباره مصرفی را نشان می دهد. سرباره مورد استفاده در این تحقیق، سرباره ی گرانوله شکل کوره قوس الکتریکی کارخانه ذوب آهن اصفهان می باشد. وزن مخصوص سرباره ۳/۴۶ گرم بر سانتی مترمکعب و نرمی آن حدود ۴۵۰۰ گرم بر سانتی مترمکعب می باشد. سرباره مورنظر پس از الک شدن در درصدهای مختلف جایگزین درشت دانه مصرفی شد.

جدول ۲-۴ : ترکیب شیمیایی سرباره

ترکیبات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
سرباره مصرفی	۳۵/۸۵	۱۳/۳۹	۱/۰۶	۳۷/۷۱	۹/۱	۲/۵۲	۰/۵۸	۰/۴۸

۴-۱-۵ لاستیک :

خرده لاستیک مورد استفاده از این پژوهش از شرکت آذران لاستیک آسیا در شهر تبریز تهیه شد. دانه بندی لاستیک تهیه شده بصورت گرانوله ۳-۵ میلی متر و گرانوله ۱-۳ میلی متر و پودرلاستیک ۰-۱ میلی متر می باشد. لاستیک ها پس از الک شده در شماره الکهای ۴-۸-۱۶-۳۰-۵۰ جایگزین مصالح طبیعی ریزدانه شدند.

۴-۱-۶ آسفالت بازیافتی (RAP) :

آسفالت های بازیافتی از جاده شاهرود میامی جمع آوری و آسیاب شدند. سپس داخل آزمایشگاه پس از الک کردن جایگزین مصالح طبیعی درشت دانه شدند.

۴-۲ تعیین درصد رطوبت بهینه

مقدار رطوبت بهینه به عنوان رطوبت مربوط به حداکثر تراکم در یک منحنی تراکم به رطوبت تعریف می شود و به خواص سنگدانه های مورد استفاده و محتوای مواد سیمانی بستگی دارد. برای بیشتر سنگدانه ها، رطوبت بهینه در محدوده ۵٪ تا ۸٪ یافت می شود. در این تحقیق از روش مبتنی بر دیدگاه خاکی برای تعیین طرح اختلاط های مختلف استفاده شده است. دیدگاه خاکی عموماً جهت تعیین نسبت های طرح اختلاط مربوط به روسازی کف های بتنی و جاده های بتن غلتکی که بیشینه قطر اسمی سنگدانه ها در آن از ۱۹ میلیمتر کمتر می باشد کاربرد دارد.

ابتدا مخلوطی بهینه از سنگدانه ها که معیارهای کمینه و بیشینه برای الک ها با اندازه های مختلف را تامین کند، تهیه می شود. این کار براساس دانه بندی هر یک از مصالح انجام می گیرد. در جدول ۳-۴ می توان مخلوط بهینه بدست آمده از سنگدانه ها به انضمام مقادیر پیشنهادی انجمن سیمان پرتلند، انجمن بتن امریکا و همچنین سازمان حمل و نقل کالیفرنیا جنوبی را مشاهده کرد.

جدول ۳-۴ : دانه بندی بهینه سنگدانه ها

الک	درصد عبوری	PCA	SCDOT	ACI
۱ اینچ	٪۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳/۴ اینچ	٪۹۶/۱۶	۹۰-۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۸۳-۱۰۰
۱/۲ اینچ	٪۸۷/۵۵	۷۰-۹۰	۷۰-۱۰۰	۷۲-۹۳
۳/۸ اینچ	٪۷۷/۳۰	۶۰-۸۵	۶۵-۸۵	۶۶-۸۵
# ۴	٪۴۰/۵۶	۴۰-۶۵	۴۰-۶۰	۵۱-۶۹
# ۸	٪۳۵/۰۷	-	-	۳۸-۵۶
# ۱۶	٪۲۴/۰۱	۲۰-۴۰	۲۰-۴۰	۲۸-۴۶
# ۳۰	٪۱۵/۵۵	-	-	۱۸-۳۶
# ۵۰	٪۱۰/۶۰	-	-	۱۱-۲۷
# ۱۰۰	٪۷/۰۴	۶-۱۶	۶-۱۸	۶-۱۸
# ۲۰۰	٪۳/۰۴	۲-۸	۲-۸	۲-۸

مقدار مواد سیمانی بر اساس الزامات مقاومت و دوام مورد نظر در روسازی، تعیین می شود و غالباً بصورت درصدی از جرم کل مصالح خشک بیان میگردد. مقدار مواد سیمانی بین ۱۰ تا ۱۸ درصد جرم مصالح خشک در روسازی های بتن غلتکی متغیر است. لوازم و مقدار انرژی تراکم برای ساخت نمونه های آزمایش رطوبت - چگالی در استاندارد ASTM D1557 شرح داده شده است. در این دیدگاه جهت تراکم نمونه ها از دو روش چکش پروکتور اصلاح شده و چکش ارتعاشی استفاده می شود. در روش پروکتور اصلاح شده، مطابق جدول ۴-۴ استوانه ها در پنج لایه پر شده و هر لایه ۲۵ بار به وسیله چکشی با وزن ۴/۵۴ کیلوگرم که از ارتفاع ۴۵۷ میلیمتری رها می گردد، کوبیده می شود [۸۱].

جدول ۴-۴ : آزمایش تراکم [۸۱]

حجم قالب	$2124/3 \text{ cm}^3$
ارتفاع قالب	$116/33 \text{ mm}$
قطر قالب	$152/4 \text{ mm}$
جرم چکش	$4/54 \text{ kg}$
ارتفاع سقوط	$457/2 \text{ mm}$
تعداد لایه‌ها	۵
تعداد ضربه‌های هر لایه	۵۶
حداکثر اندازه اسمی سنگدانه	19 mm

در روش دوم از چکش ارتعاشی یا چکش ضربه ای استفاده می شود. در اینجا نیز مانند بتن دارای اسلامپ، میتوان قالب گیری نمونه ها را در سه لایه انجام داد. در استفاده از چکش ارتعاشی نمونه ها تا زمان ظاهر شدن شیریه بتن در فضای بین دیواره قالب و صفحه کوبشی تحت اثر تراکم قرار می گیرند. این زمان معمولاً ۵-۱۵ ثانیه طول میکشد و اگر هیچ شیرهای در این فضا تشکیل نشد، تراکم باید بعد از ۲۰ ثانیه متوقف شود. در مقایسه با روش چکش پروکتور، چکش ارتعاشی بسیار سریعتر بوده و حتی دانسیته بدست آمده با دانسیته بدست آمده از روش پروکتور اصلاح شده و غلتک های ارتعاشی، در عمل برابری می کند. از دیگر ویژگی های این روش این است که چکش ارتعاشی در دامنه پایین و فرکانس بالا کار میکند که از این نظر با روش کار غلتک ارتعاشی مشابه است. به منظور تعیین مقدار رطوبت مطلوب ، نمونه ها از نمونه های متراکم شده گرفته شده و در فر با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد تا یک جرم ثابت خشک شدند. مقدار آب، تراکم مرطوب و تراکم خشک با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد:

$$\text{رابطه ۴-۱} \quad 100 \times \frac{\text{وزن بتن خشک} - \text{وزن بتن مرطوب}}{\text{وزن بتن خشک}} = \text{درصد مقدار آب}$$

$$\text{رابطه ۴-۲} \quad \text{وزن بتن مرطوب (kg)} = \frac{\text{وزن مخصوص بتن مرطوب}}{\text{حجم بتن (m}^3\text{)}} \times \text{وزن مخصوص بتن خشک}$$

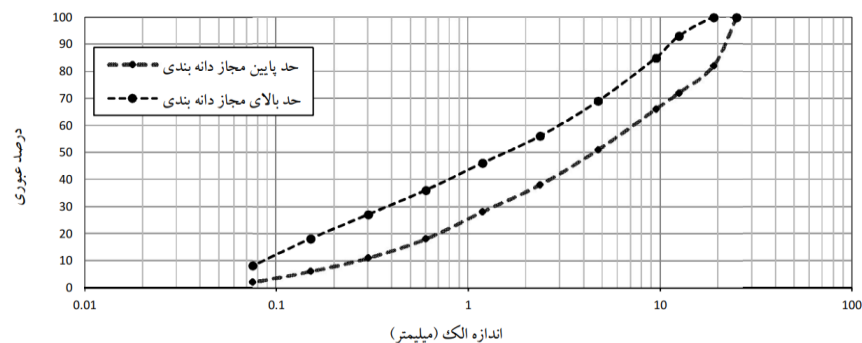
$$\text{رابطه ۴-۳} \quad \text{وزن مخصوص بتن خشک} = \frac{\text{وزن مخصوص بتن مرطوب}}{1 + \text{درصد مقدار آب}}$$

۴-۲-۱ تعیین درصد رطوبت بهینه در آزمایشگاه :

محدوده دانه بندی توصیه شده برای سنگدانه هایی که بیشینه قطر اسمی دانه ای آن ۱۹ میلی متر می باشد، به منظور استفاده در طرح اختلاط روسازی های بتن غلتکی، در جدول ۴-۵ و نمودار شکل ۴-۳ آمده است.

جدول ۴-۵ : دانه بندی انتخابی پژوهش براساس محدوده دانه بندی ACI

شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی
		حد بالا	حد پایین	
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۰/۷۵	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸
۰/۵	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷
۰/۳۷۵	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹
#4	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹
#8	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸
#16	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸
#30	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸
#50	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱
#100	۰/۱۵	۱۸	۶	۶
#200	۰/۰۷۵	۸	۲	۲
pan	۰			



شکل ۴-۳ : محدوده دانه بندی استفاده شده در طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی

بر اساس استاندارد بتن غلتکی ایران، بتن غلتکی ظاهری شبیه خاک نم دار دارد ولی در حالت سخت شده مشابه بتن های معمولی بوده و با توجه به مقدار کمتر آب در این مخلوطها در صورت تراکم مناسب جرم حجمی آن قدری بیشتر از بتنهای معمولی نیز می شود. جرم حجمی حدود ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بتنهای غلتکی روسازی مقادیری متعارف است [۳، ۵]. از آنجاییکه درصد سیمان متغیری برای پروژه نبوده لذا مقدار سیمان برای کلیه مخلوط های موجود در این مطالعه، ۱۸/۸٪ از جرم کل مواد جامد خشک به منظور ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان برای تمامی نمونه ها انتخاب شده است. به منظور بررسی تأثیر رطوبت بر عملکرد RCCP، شش مخلوط در ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ درصد از درصدهای آب تهیه شد. در رابطه ۴-۴ معادله کلی برای یافتن درصد رطوبت و مقدار مصالح مورد نیاز برای هر درصد انتخابی نشان داده شده است.

$$X + 0.188 X + \left[\begin{array}{l} 0.5 X \\ 0.6 X \\ 0.7 X \\ 0.8 X \\ 0.1 X \end{array} \right] = 2500$$

رابطه ۴-۴ :

X = وزن مصالح (کیلوگرم بر مترمکعب)

برای مثال در درصد رطوبت ۵ درصد، معادله و مقادیر بدست آمده به صورت زیر می باشد :

$$X + 0.188 X + 0.05X = 2500$$

$$X = 2019/38 \text{ kg/m}^3$$

از جدول ۴-۶ وزن کل مورد نیاز برای قالب پروکتور در درصد رطوبت ۵٪ برابر ۴/۲۰۶۷ کیلوگرم بدست آمده است. حال در جدول ۴-۷ جزییات مربوط به دانه بندی درصد رطوبت ۵٪ و مقدار موردنیاز برای هر الک نشان داده شده است. همچنین جداول ۴-۹ و ۴-۱۰ بصورت مختصر وزن نهایی مانده روی هر الک را برای درصد رطوبت های مختلف نشان می دهد.

جدول ۴-۶ : درصدهای مختلف آب برای ساخت نمونه به منظور رسیدن به درصد رطوبت بهینه

$X = 2019/38$
$2019/38 \times 0.021 = 4/240.6$
$0.188(2019/38) \times 0.021 = 0.797$
$0.05(2019/38) \times 0.021 = 0.212$
$X = 2003/2$
$2003/2 \times 0.021 = 4/20.67$
$0.188(2003/2) \times 0.021 = 0.7908$
$0.06(2003/2) \times 0.021 = 0.252$

$X = 1987/28$
$1987/28 \times 0.021 = 4/17$
$0.188(1987/28) \times 0.021 = 0.784$
$0.07(1987/28) \times 0.021 = 0.292$
$X = 1971/6$
$1971/6 \times 0.021 = 4/14.3$
$0.188(1971/6) \times 0.021 = 0.778$
$0.08(1971/6) \times 0.021 = 0.331$

$X = 1940/99$
$1940/99 \times 0.021 = 4/0.76$
$0.188(1940/99) \times 0.021 = 0.766$
$0.1(1940/99) \times 0.021 = 0.407$

درصد رطوبت ۵٪
مصلح مورد نیاز قالب kg
سیمان kg
آب kg
درصد رطوبت ۶٪
مصلح مورد نیاز قالب kg
سیمان kg
آب kg

درصد رطوبت ۷٪
مصلح مورد نیاز قالب kg
سیمان kg
آب kg
درصد رطوبت ۸٪
مصلح مورد نیاز قالب kg
سیمان kg
آب kg

درصد رطوبت ۱۰٪
مصلح مورد نیاز قالب kg
سیمان kg
آب kg

جدول ۴-۷: جزییات دانه بندی درصد رطوبت ۵ درصد و وزن مانده روی هر الک بر حسب گرم

محاسبات مربوط به درصد رطوبت ۵ درصد و تعیین وزن مانده روی هر الک (حجم قالب ۰/۰۰۲۱ مترمکعب - وزن مخصوص سنگدانه ۲۰۱۹/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب)							
شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی	درصد کل مصالح مانده	درصد مانده مصالح روی هر الک به صورت مجزا	وزن کل مصالح (گرم)
		حد بالا	حد پایین				
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
۰/۷۵(۳/۴)	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸	۲	۲	۸۴/۸۱
۰/۵(۱/۲)	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷	۱۳	۱۱	۴۶۶/۴۸
۰/۳۷۵(۳/۸)	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹	۲۱	۸	۳۳۹/۲۶
#۴	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹	۳۱	۱۰	۴۲۴/۰۷
#۸	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸	۶۲	۳۱	۱۳۱۴/۶۲
#۱۶	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸	۷۲	۱۰	۴۲۴/۰۷
#۳۰	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸	۸۲	۱۰	۴۲۴/۰۷
#۵۰	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱	۸۹	۷	۲۹۶/۸۵
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۸	۶	۶	۹۴	۵	۲۱۲/۰۳
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۸	۲	۲	۹۸	۴	۱۶۹/۶۳
pan	۰				۱۰۰	۲	۸۴/۸۱
							۴۲۴۰/۷۰

جدول ۴-۸: وزن نهایی روی هر الک برای درصد رطوبت ۶ و ۷ درصد

شماره الک	وزن کل مصالح (گرم)	درصد رطوبت ۷٪	شماره الک	وزن کل مصالح (گرم)
۱	۰		۱	۰
۰/۷۵	۸۴/۱۳		۰/۷۵	۸۳/۴۷
۰/۵	۴۶۲/۷۴		۰/۵	۴۵۹/۰۶
۰/۳۷۵(۳/۸)	۳۳۶/۵۴		۰/۳۷۵(۳/۸)	۳۳۳/۸۶
#۴	۴۲۰/۶۷		#۴	۴۱۷/۳۲
#۸	۱۳۰۴/۰۸		#۸	۱۲۹۳/۷۲
#۱۶	۴۲۰/۶۷		#۱۶	۴۱۷/۳۲
#۳۰	۴۲۰/۶۷		#۳۰	۴۱۷/۳۲
#۵۰	۲۹۴/۴۷		#۵۰	۲۹۲/۱۳
#۱۰۰	۲۱۰/۳۴		#۱۰۰	۲۰۸/۶۶
#۲۰۰	۱۶۸/۲۷		#۲۰۰	۱۶۶/۹۳
pan	۸۴/۱۳		pan	۸۳/۴۷
	۴۲۰۶/۷۲			۴۱۷۳/۲۹

جدول ۴-۹: وزن نهایی روی هر الک برای درصد رطوبت ۸ و ۱۰ درصد

شماره الک	وزن کل مصالح (گرم)	درصد رطوبت ۱۰٪	شماره الک	وزن کل مصالح (گرم)
۱	۰		۱	۰
۰/۷۵	۸۱/۵۲		۰/۷۵	۸۲/۸۱
۰/۵	۴۴۸/۳۷		۰/۵	۴۵۵/۴۴
۰/۳۷۵(۳/۸)	۳۲۶/۰۹		۰/۳۷۵(۳/۸)	۳۳۱/۲۳
#۴	۴۰۷/۶۱		#۴	۴۱۴/۰۴
#۸	۱۲۶۳/۵۸		#۸	۱۲۸۳/۵۱
#۱۶	۴۰۷/۶۱		#۱۶	۴۱۴/۰۴
#۳۰	۴۰۷/۶۱		#۳۰	۴۱۴/۰۴
#۵۰	۲۸۵/۳۲		#۵۰	۲۸۹/۸۲
#۱۰۰	۲۰۳/۸۰		#۱۰۰	۲۰۷/۰۲
#۲۰۰	۱۶۳/۰۴		#۲۰۰	۱۶۵/۶۱
pan	۸۱/۵۲		pan	۸۲/۸۱
	۴۰۷۶/۰۸			۴۱۴۰/۳۶

مصالح به مدت ۲۴ ساعت داخل آزمایشگاه قرار گرفتند تا رطوبت خود را از دست داده و خشک شوند، سپس داخل الک ها ریخته شدند و دانه بندی صورت گرفت. الک ها به ترتیب مطابق شکل ۴-۴ از الک ۱ اینچ تا الک شماره ۲۰۰ روی هم قرار گرفتند و داخل لرزاننده (شیکر) قرار گرفته و الک شدند. سپس از دستگاه لرزاننده خارج شده و مقدار مورد نیاز از هر الک وزن شد(شکل ۴-۵).



شکل ۴-۴: الکهای قرارداده شده در دستگاه لرزاننده



شکل ۴-۵: الکهای خارج شده از دستگاه لرزاننده

۴-۲-۲ قالب پروکتور:

ابعاد قالب از استاندارد ASTM D1557 انتخاب شده است که به ترتیب زیر می باشد. قطر قالب ۱۵۲ میلی متر و ارتفاع قالب ۱۱۶ میلیمتر و حجم آن نیز ۰/۰۰۲۱ مترمکعب می باشد. وزن قالب بعلاوه کفی آن نیز برابر ۵۰۰۸/۵ گرم می باشد [۸۱].



شکل ۴-۶: قالب پروکتور



شکل ۴-۷ : دستگاه اوون

بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه ها تک تک از داخل اوون خارج کرده و تا کمی حرارت آن کاسته شده و آماده برای مخلوط کردن شوند (شکل ۴-۷). در این حین وزن سیمان و آب را بدست آورده و آن ها را نیز آماده می کنیم (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸ : مصالح وزن شده

حال شروع به مخلوط کردن مصالح می کنیم. ابتدا مصالح سنگی را داخل ظرف با دست حدود ۲ دقیقه کامل مخلوط می کنیم و سپس کم کم سیمان را به آن اضافه می کنیم و همچنان با دست آنرا مخلوط می کنیم (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹ : مخلوط مصالح بتنی برای درصد رطوبت بهینه

حال مصالح را داخل میکسر ریخته و سپس آب را به آن اضافه می کنیم و مجدداً با دست کمی آنرا مخلوط کرده و سپس میکسر را روشن کرده و مخلوط را حدود ۴ دقیقه داخل میکسر هم می زنیم.



شکل ۴-۱۰ : میکسر

بعد گذشت ۴ دقیقه دستگاه را خاموش کرده و مصالح را از آن خارج کرده تا زیر دستگاه پروکتور قرار دهیم. همانطور که در شکل دیده می شود بدلیل پایین بودن درصد رطوبت درشت دانه و ریز دانه کاملاً درهم مخلوط نشده و درشت دانه به راحتی میتواند از ریزدانه جدا شود.



شکل ۴-۱۱ : مخلوط نهایی بتن غلتکی

۴-۲-۳ دستگاه تراکم:

نمونه را بعد اینکه از میکسر خارج کردیم باید داخل قالب پروکتور ریخته و زیر دستگاه قرار دهیم. مصالح باید در ۵ لایه داخل قالب جای داده شوند و در هر لایه ۵۶ ضربه اعمال شود (شکل ۴-۱۲). تنظیمات دستگاه پروکتور را روی قالب ۶ اینچ گذاشته زیرا قطر قالب ۶ اینچ بوده و در این حالت کوبه کمی به چپ و راست حرکت دارد و ضربه مستقیم به یک نقطه اعمال نمی شود. تعداد ۵۶ ضربه را نیز به دستگاه داده تا شمارش را انجام داده و بعد از پایان ضربات متوقف شود (شکل ۴-۱۳). هر لایه باید بعد از ۵۶ ضربه ضخامت حدود ۲/۵ سانتی متر داشته باشد، به همین خاطر در هنگام ریختن نمونه داخل قالب ضخامت بیشتری را می ریزیم. همانطور که مشخص است از لایه سوم، بدنه اضافی را روی قالب سوار می کنیم تا مصالح بیرون نریزد.



شکل ۴-۱۲ : دستگاه تراکم

مخلوط داخل ظرف، مخلوط اضافی بوده است که بدلیل وجود خطا بیشتر ساخته بودیم، بعد از پایان ۵ لایه، قالب را از زیر دستگاه خارج کرده و بدنه بالایی را باز می کنیم و سطح قالب را صاف می کنیم.



شکل ۴-۱۳ : مخلوط در حال متراکم شدن

بعد اینکه سطح قالب مسطح شد، وزن قالب را ثبت می کنیم. حال می توان وزن مخصوص مرطوب را با داشتن وزن و حجم براحتی بدست آورد.



شکل ۴-۱۴ : مخلوط نهایی دستگاه تراکم

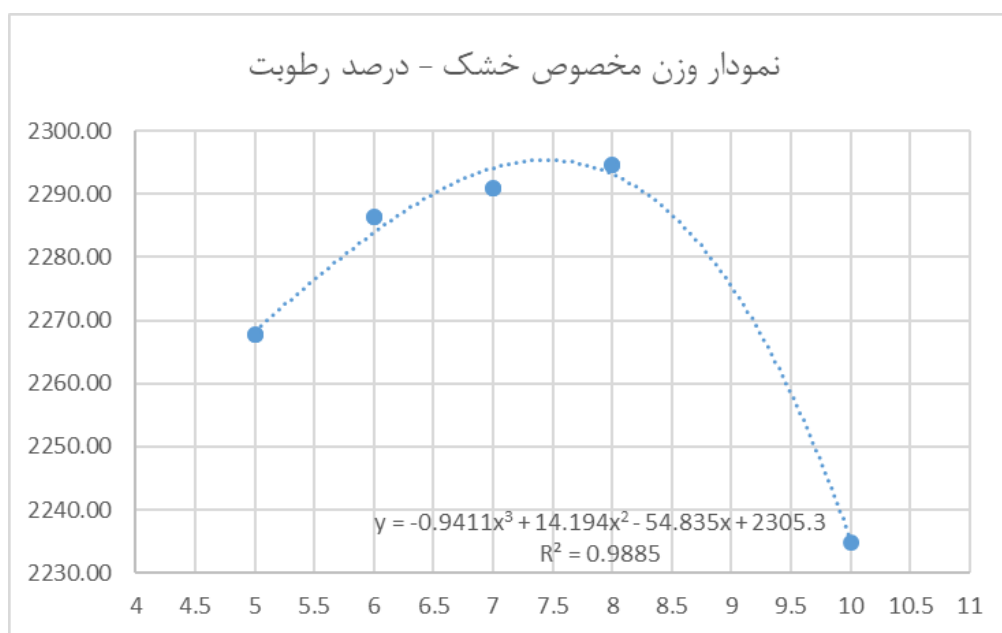
بعد از وزن کردن نمونه، آنرا از داخل قالب بیرون ریخته و قالب و تجهیزات را آماده ساخت نمونه دوم تا پنجم می کنیم.

۴-۲-۴ رسم نمودار درصد رطوبت - وزن مخصوص خشک :

با استفاده از روابط مربوط به یافتن درصد رطوبت بهینه (جدول ۴-۱۰) می توان نمودار وزن مخصوص خشک به درصد آب را ترسیم و از روی شکل ۴-۱۵ درصد رطوبت بهینه را بدست آورد.

جدول ۴-۱۰: محاسبه وزن مخصوص مرطوب و خشک برای درصد رطوبتهای مختلف

۱۰۰٪ مصالح طبیعی						
طرح	درصد رطوبت	وزن آب (gr)	وزن نمونه مرطوب و قالب (gr)	وزن نمونه مرطوب (gr)	وزن مخصوص مرطوب (Kg/m ³)	وزن مخصوص خشک (Kg/m ³)
۱	۵	۲۱۲	۱۰۰۰۸/۷	۵۰۰۰/۲	۲۳۸۱/۰۵	۲۲۶۷/۶۶
۲	۶	۲۵۲	۱۰۰۹۷/۷	۵۰۸۹/۲	۲۴۲۳/۴۳	۲۲۸۶/۲۵
۳	۷	۲۹۲	۱۰۱۵۶/۴	۵۱۴۷/۹	۲۴۵۱/۳۸	۲۲۹۱/۰۱
۴	۸	۳۳۱	۱۰۲۱۲/۸	۵۲۰۴/۳	۲۴۷۸/۲۴	۲۲۹۴/۶۶
۵	۱۰	۴۰۷	۱۰۱۷۱	۵۱۶۲/۵	۲۴۵۸/۳۳	۲۲۳۴/۸۵



شکل ۴-۱۵ : نمودار درصد رطوبت بهینه

درصد رطوبت بهینه برای مصالح سنگی ۸ درصد بدست آمده است که نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۲ می شود.

۳-۴ تعیین چگالی و چگالی نسبی و درصد جذب آب مصالح درشت دانه:

۱-۳-۴ تعیین چگالی و چگالی نسبی و درصد جذب آب مصالح درشت دانه:

میزان چگالی نسبی و درصد جذب آب مصالح درشت دانه و مصالح ریزدانه را میتوان بر اساس ASTM C 127-128 محاسبه کرد.

مراحل انجام آزمایش چگالی و چگالی نسبی درشت دانه در آزمایشگاه:

- ۱- الک کردن مصالح سنگی با الک نمره ۴ و برداشتن مصالح مانده روی الک
- ۲- ریختن مصالح مانده روی الک ۴ درون ظرف آب و ماندن مصالح در آب به مدت ۲۴ ساعت برای اشباع شدن
- ۳- کالیبره کردن ترازو
- ۴- وزن کردن ظرف نمونه برداری
- ۵- برداشتن مصالح از درون آب (هنگام برداشتن مصالح از درون ظرف آب با بیلچه، آب همراه مصالح را تخلیه میکنیم) و ریختن آن بر روی پارچه های جاذب رطوبت (حدود ۲ کیلو مصالح برداشته شود).
- ۶- خشک کردن سطح مصالح با پارچه (سطح مصالح را آنقدر خشک می کنیم تا سطح آن برق نزند).
- ۷- ریختن مصالح با سطح خشک در درون ظرف نمونه و توزین آن.
- ۸- کالیبره کردن ترازوی ارشمیدس به همراه سبد توری قرار گرفته داخل آب (تمام سبد و دسته سبد باید کاملاً داخل آب باشد).
- (قانون ارشمیدس را می توان عمومی تر تعریف کرد: کاهش وزن یک جسم در سیال، برابر با وزن سیال جابجا شده توسط آن جسم است. علت کاهش وزن نیرویی است که از سمت سیال به جسم وارد می شود).
- ۹- ریختن مصالح شنی اشباع با سطح خشک و توزین شده در درون سبد ارشمیدس و توزین نمونه در ترازوی ارشمیدس
- ۱۰- ریختن مصالح داخل سبد توری ارشمیدس، داخل ظرف نمونه گیری (ظرفی که وزن خالی آن را ثبت کرده ایم) و قرار دادن آن داخل گرم خانه به مدت ۲۴ ساعت



شکل ۴-۱۶ : وزن مصالح غوطه ور در آب

۱۱- توزین نمونه خشک شده پس از ۲۴ ساعت قرار گیری در گرم خانه

۱۲- محاسبه پارامترهای مورد نیاز از فرمول های زیر :

$$\text{چگالی نسبی OD مصالح درشت دانه} = \frac{A}{B-C}$$

$$\text{چگالی نسبی SSD مصالح درشت دانه} = \frac{B}{B-C}$$

$$\text{چگالی نسبی ظاهری مصالح درشت دانه} = \frac{A}{A-C}$$

$$\text{درصد جذب آب مصالح درشت دانه در حالت SSD} = 100 \times \frac{B-A}{A}$$

A= وزن نمونه خشک شده (نمونه خارج شده از سبد ارشمیدس و قرار گرفته داخل گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت)

B= وزن نمونه اشباع با سطح خشک (نمونه اشباعی که سطح آن را با دستمال خشک کرده ایم)

C= وزن نمونه اشباع داخل آب (وزن ثبت شده از ترازوی ارشمیدس)

۴-۳-۲ تعیین چگالی و چگالی نسبی ظاهری و واقعی مصالح ریزدانه و میزان جذب رطوبت آنها در حالت SSD :

به منظور تعیین چگالی و چگالی نسبی مصالح ریزدانه دو روش در استاندارد ذکر شده است:

۱- روش وزنی با استفاده از چگالی سنج

۲- روش حجمی با استفاده از بالن لوشاتلیه در این پروژه از روش وزنی استفاده شده است .

مراحل انجام آزمایش چگالی و چگالی نسبی ریزدانه در آزمایشگاه

۱-الک کردن مصالح سنگی با الک نمره ۴ و برداشتن مصالح عبوری از الک

۲-ریختن مصالح عبوری از الک ۴ درون ظرف آب و ماندن مصالح در آب به مدت ۲۴ ساعت برای اشباع شدن

۳-برداشتن مصالح بعد از ۲۴ ساعت و ریختن آن بر روی یک سطح که جاذب رطوبت نباشد و عبور دادن هوای گرم بر مصالح تا هنگام شروع به حرکت نمودن مصالح (در این صورت مصالح ماسه در حالت SSD قرار دارد) - (برای تسریع در زمان آزمایش ، ماسه SSD در آزمایشگاه آماده می باشد)

۴-کالیبره کردن ترازو

۵-پر کردن چگالی سنج از آب تا خط ظرفیت

۶-خشک کردن سطح بیرون چگالی سنج و توزین چگالی سنج پر از آب تا خط ظرفیت

۷-وزن کردن ظرف نمونه گیری خالی

۸-برداشتن ۵۰۰ گرم ماسه SSD (دقیقاً ۵۰۰ گرم مصالح برداشته شود)

۹-تخلیه حدود دو سوم آب چگالی سنج

۱۰- ریختن ۵۰۰ گرم ماسه SSD بوسیله قیف داخل چگالی سنج (مصالح را به آرامی داخل چگالی سنج می ریزیم)

۱۱- چرخاندن بالن بطور مایل بر روی کف دست برای خارج شدن حباب های هوای داخل مصالح

۱۲- پر کردن چگالی سنج از آب تا خط ظرفیت) در هنگام ریختن آب مصالح چسبیده به جداره های چگالی سنج را بشوید- برای رسیدن به خط ظرفیت در نزدیکی آن از پیست استفاده شود و آب زیر کف تا خط ظرفیت رسانده شود.

۱۳- خشک کردن سطح بیرون چگالی سنج با دستمال

- ۱۴- توزین چگالی سنج پر از آب تا خط ظرفیت به همراه ۵۰۰ گرم مصالح داخل آن
- ۱۵- برداشتن ۵۰۰ گرم دیگر از ماسه SSD و قرار دادن آن داخل گرم خانه به مدت ۲۴ ساعت
- ۱۶- توزین ماسه داخل گرمخانه بعد از ۲۴ ساعت (از هر گروه یک نماینده انتخاب شود و تیم حاصل یک نمونه ۵۰۰ گرمی داخل گرمخانه قرار دهند و همه گروه ها از اعداد آن استفاده کنند).



شکل ۴-۱۷ : ماسه SSD

- ۱۷- محاسبه پارامترهای مورد نیاز از فرمول های زیر :

$$\text{نسبی چگالی OD مصالح ریز دانه} = \frac{A}{B+S-C}$$

$$\text{نسبی چگالی SSD مصالح ریز دانه} = \frac{S}{B+S-C}$$

$$\text{نسبی ظاهری مصالح ریز دانه} = \frac{A}{B+A-C}$$

$$\text{درصد جذب آب مصالح ریز دانه در حالت SSD} = 100 \times \frac{S-A}{A}$$

A = وزن نمونه خشک شده (وزن نمونه خارج شده از گرمخانه پس از ۲۴ ساعت)

B = وزن چگالی سنج پر از آب تا خط ظرفیت

S = وزن نمونه اشباع با سطح خشک

C = وزن چگالی سنج حاوی آب و نمونه

۳-۳-۴ محاسبات مرتبط با چگالی و درصد جذب آب :

جدول ۴-۱۱: محاسبات مربوط به چگالی درشت دانه مصالح طبیعی

آزمایش چگالی و چگالی نسبی درشت دانه AGG		
چگالی نسبی OD مصالح درشت دانه	$\frac{A}{B - C}$	$\frac{2988.2}{3000.15 - 1881.7} = 2.67$
چگالی نسبی SSD مصالح درشت دانه	$\frac{B}{B - C}$	$\frac{3000.15}{3000.15 - 1881.7} = 2.68$
چگالی نسبی ظاهری مصالح درشت دانه	$\frac{A}{A - C}$	$\frac{2988.2}{2988.2 - 1881.7} = 2.61$
درصد جذب آب مصالح درشت دانه در حالت SSD	$\frac{(B-A)}{A} * 100$	$\frac{3000.15 - 2988.2}{2988.2} * 100 = 0.4$

A	وزن نمونه خشک شده (نمونه خارج شده از سید ارشمیدس و قرار گرفته داخل گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت)
B	وزن نمونه اشباع با سطح خشک (نمونه اشباعی که سطح آن را با دستمال خشک کرده ایم)
C	وزن نمونه اشباع داخل آب (وزن ثبت شده از ترازوی ارشمیدس)

وزن ظرف خالی (گرم)	827	$A = 3815.2 - 827 = 2988.2$ $B = 3827.15 - 827 = 3000.15$ $C = 1881.7$
وزن ظرف خالی و مصالح اشباع با سطح خشک (گرم)	3827.15	
وزن ترازو ارشمیدس (گرم)	1881.7	
وزن ظرف خالی و مصالح بعد از خرج شدن از اوون (گرم)	3815.2	

جدول ۴-۱۲: محاسبات مربوط به چگالی آسفالت بازیافتی

آزمایش چگالی و چگالی نسبی درشت دانه RAP		
چگالی نسبی OD مصالح درشت دانه	$\frac{A}{B - C}$	$\frac{992.9}{1000.84 - 615.3} = 2.57$
چگالی نسبی SSD مصالح درشت دانه	$\frac{B}{B - C}$	$\frac{1000.84}{1000.84 - 615.3} = 2.58$
چگالی نسبی ظاهری مصالح درشت دانه	$\frac{A}{A - C}$	$\frac{992.9}{992.9 - 615.3} = 2.59$
درصد جذب آب مصالح درشت دانه در حالت SSD	$\frac{(B-A)}{A} * 100$	$\frac{1000.84 - 992.9}{992.9} * 100 = 0.8$

A	وزن نمونه خشک شده (نمونه خارج شده از سید ارشمیدس و قرار گرفته داخل گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت)
B	وزن نمونه اشباع با سطح خشک (نمونه اشباعی که سطح آن را با دستمال خشک کرده ایم)
C	وزن نمونه اشباع داخل آب (وزن ثبت شده از ترازوی ارشمیدس)

وزن ظرف خالی (گرم)	815.9	$A = 1808.8 - 815.9 = 992.9$ $B = 1816.74 - 815.9 = 1000.84$ $C = 615.3$
وزن ظرف خالی و مصالح اشباع با سطح خشک (گرم)	1816.74	
وزن ترازو ارشمیدس (گرم)	615.3	
وزن ظرف خالی و مصالح بعد از خرج شدن از اوون (گرم)	1808.8	

جدول ۴-۱۳: محاسبات مربوط به چگالی سرباره

آزمایش چگالی و چگالی نسبی درشت دانه SLAG		
چگالی نسبی OD مصالح درشت دانه	$\frac{A}{B - C}$	$\frac{1030.1}{1042.97 - 735.6} = 3.35$
چگالی نسبی SSD مصالح درشت دانه	$\frac{B}{B - C}$	$\frac{1042.97}{1042.97 - 735.6} = 3.39$
چگالی نسبی ظاهری مصالح درشت دانه	$\frac{A}{A - C}$	$\frac{1030.1}{1030.1 - 735.6} = 3.46$
درصد جذب آب مصالح درشت دانه در حالت SSD	$\frac{(B - A)}{A} * 100$	$\frac{1042.97 - 1030.1}{1030.1} * 100 = 1.25$

A	وزن نمونه خشک شده (نمونه خارج شده از سبد ارشمیدس و قرار گرفته داخل گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت)
B	وزن نمونه اشباع با سطح خشک (نمونه اشباعی که سطح آن را با دستمال خشک کرده ایم)
C	وزن نمونه اشباع داخل آب (وزن ثبت شده از ترازوی ارشمیدس)

وزن ظرف خالی (گرم)	185.2	$A = 1215.3 - 185.2 = 1030.1$ $B = 1228.17 - 185.2 = 1042.97$ $C = 735.6$
وزن ظرف خالی و مصالح اشباع با سطح خشک (گرم)	1228.17	
وزن ترازو ارشمیدس (گرم)	735.6	
وزن ظرف خالی و مصالح بعد از خرج شدن از اوون (گرم)	1215.3	

جدول ۴-۱۴: محاسبات مربوط به چگالی ریزدانه مصالح طبیعی

آزمایش درصد جذب آب ریز دانه AGG		
درصد جذب آب مصالح ریز دانه در حالت SSD	$\frac{(S - A)}{A} * 100$	$\frac{3263.1 - 3102.1}{3102.1} * 100 = 5.19$
وزن نمونه خشک شده (وزن نمونه خارج شده از گرمخانه پس از ۲۴ ساعت)		A
وزن نمونه اشباع با سطح خشک		S

وزن ظرف خالی (گرم)	826.5	$A = 3928.6 - 826.5 = 3102.1$ $S = 4089.6 - 826.5 = 3263.1$
وزن ظرف خالی و مصالح اشباع با سطح خشک (گرم)	4089.6	
وزن ظرف خالی و مصالح بعد از خرج شدن از اوون (گرم)	3928.6	

۴-۴ ساخت بتن

اگر چه روش اصلی برای تراکم RCC غلتک ارتعاشی 10 تن است، منتهی استفاده از غلتک برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی غیر عملی است. تعدادی از تکنیک ها و تجهیزات جایگزین را می توان برای تهیه نمونه های آزمایشگاهی استفاده کرد، برای مثال میز ویبره (از جمله میز Vebe)، چکش ضربه ایی، چکش ارتعاشی، چکش پنوماتیک سنگین، روش پراکتور اصلاح شده و تراکم ژیراتوری. علاوه بر این، تجهیزات دیگری که شبیه سازی شرایط واقعی سایت RCC باشد را می توان برای تهیه نمونه RCC استفاده کرد. در یک روش نمونه بتن غلتکی در داخل قالب و روی میز ارتعاش، تحت وزن سربار و در چند لایه متراکم می شود. در ساخت نمونه های مورد نیاز در این تحقیق از این روش استفاده شده است. استاندارد ASTM C1176 جزئیات این روش را بیان می کند. در روش دیگر نمونه ها به وسیله ضربات کوبه، در چند لایه، مطابق روش ذکر شده در ASTM D1557 ساخته می شوند [۸۱]. در تحقیقات مختلف طبق روش نخست (تراکم با میز ارتعاشی) تعداد لایه ها بین ۱ تا ۳ لایه متفاوت بوده است. وزن سربار نیز بین ۱۱/۳ تا ۹۰/۷ کیلوگرم، بسته به نوع نمونه ها متفاوت بوده است. ایجاد تراکم کامل در نمونه بتن غلتکی با استفاده از میز ارتعاشی مشکل است و غالباً در مقایسه با مغزه های گرفته شده از روسازی راه، نمونه های آزمایشی ساخته شده توسط میز ارتعاشی، چگالی کمتری داشته اند این میزان تراکم کمتر در آزمایشگاه بویژه هنگامی که یک میز ارتعاشی با دامنه کم، تحت سربار استفاده می شود شایعتر است. میز ارتعاشی مورد استفاده باید الزامات استانداردهای ASTM D4253 و ASTM D4254 را ارضا نماید. نمونه های متراکم شده توسط کوبه می توانند چگالی مشابه نمونه های اخذ شده از روسازی را دارا باشند که البته در این صورت هنگام ساخت نمونه تعداد ضربات قابل توجهی باید بکار برد. تعداد ضربات و ارتفاع رها شدن کوبه برای کلیه نمونه ها بایستی ثابت باشد تا نتایج یکنواخت و قابل اتکایی بدست آید. نمونه های استوانه ای مانند استوانه به قطر ۱۵ سانتی متر جهت تراکم با کوبه مناسب اند، لیکن برای نمونه های خمشی که دارای سطح قابل توجه هستند کاربرد روش تراکم کوبه ای عمدتاً غیر عملی است و روش های تراکم ارتعاشی تحت سربار عملی تر هستند.

۴-۴-۱ روغن کاری قالبها:

معمولاً سطح تماس بتن و قالب نمونه گیری را به وسیله ی روغن های معدنی چرب می کنند. مالیدن روغن به درون قالب بدان علت است که اولاً قالب که در ابتدا کاملاً خشک است، آب بتن درون خود را نمکیده و موجب فساد بتن نشود و در ثانی در موقع باز کردن قالب، قالب براحتی از بتن جدا شود و موجب تخریب نمونه های بتنی نشود و در صورت مناسب بودن، برای قالب بندی بعدی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۴-۱۸ : روغن کاری قالبها

۴-۴-۲ ساخت نمونه های اصلی

با تعیین رطوبت بهینه ی طرح اختلاط، شرایط برای ساخت نمونه های اصلی آماده می باشد. تمامی نمونه ها با نسبت آب به سیمان یکسان ساخته شدند و در طرح اختلاط هایی که از مصالح جایگزین مصالح سنگی استفاده شد بنابر بر درصد جذب آب مصالح جایگزین، مقدار آب طرح اختلاط افزوده یا کاسته شد.

جدول ۴-۱۵ : درصد مانده روی هر الک

محاسبه درصد وزنی مصالح سنگی						
شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی	درصد کل مصالح مانده	درصد مانده مصالح روی هر الک به صورت مجزا
		حد بالا	حد پایین			
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰
۰/۷۵ (۳/۴)	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸	۲	۲
۰/۵ (۱/۲)	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷	۱۳	۱۱
۰/۳۷۵ (۳/۸)	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹	۲۱	۸
#۴	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹	۳۱	۱۰
#۸	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸	۶۲	۳۱
#۱۶	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸	۷۲	۱۰
#۳۰	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸	۸۲	۱۰
#۵۰	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱	۸۹	۷
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۸	۶	۶	۹۴	۵
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۸	۲	۲	۹۸	۴
pan	۰				۱۰۰	۲

۴-۴-۳ مراحل اختلاط بتن

برای ساخت نمونه های بتنی ابتدا سنگدانه های درشت و ریز و سیمان را بخوبی در بیرون از میکسر و درون ظرفی بزرگ مخلوط و درون میکسر ریخته می شوند و کمتر از یک پنجم آب اختلاط به آن اضافه گردید. با گردش میکسر مخصوص سطح دانه ها به طور یکنواخت مرطوب شد. با مخلوط شدن شن و ماسه و سیمان (سیمان پوزولانی) بقیه آب اختلاط را نیز درون میکسر ریخته شد. بعد از افزودن آب به مخلوط عمل اختلاط به مدت سه دقیقه ادامه پیدا کرد. نمونه ها به روش ارتعاش بر روی میز ارتعاشی تحت سربار و مطابق با استاندارد ASTM C1176 ساخته شدند. طبق این استاندارد نمونه های استوانه ای در سه لایه مساوی تحت سربار ۹۱۰۰ گرم (استوانه ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر) روی میز لرزان وی بی به مدت حدود ۳۰ - ۴۰ ثانیه مرتعش گردیدند. این روش به جای کوبیدن و ویبره داخلی به کار می رود چرا که روش کوبیدن با میله و ویبره داخلی نمی تواند به خوبی، بتن با روانی بسیار کم را متراکم کند.



شکل ۴-۱۹: دستگاه وی بی

از آنجایی که نمونه مورد آزمایش برای مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم، استوانه ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر و نمونه مورد آزمایش برای مقاومت خمشی، تیری منشوری به ابعاد $۱۰ \times ۱۰ \times ۳۵$ سانتیمتر بوده است لذا باید وزن سربار مورد نیاز با توجه به سطح تنش افزایش یا کاهش یابد. به همین منظور در جدول ۴-۱۶ و ۴-۱۷ محاسبات مربوط به وزن سربار مورد نیاز انجام شده است. سربار ساخته شده برای آزمایش مقاومت فشاری و خمشی مطابق شکل های ۴-۲۰ و ۴-۲۱ می باشد.

جدول ۴-۱۶: محاسبات اضافه بار بر نمونه استاندارد

استاندارد	ASTM C1176
نمونه استاندارد (سانتیمتر)	استوانه: قطر ۱۵-ارتفاع ۳۰
اضافه بار (گرم)	۹۱۰۰
سطح تنش (سانتی مترمربع)	$۳/۱۴ \times ۷/۵ \times ۷/۵ = ۱۷۶/۷۱۴$
تنش (گرم/سانتی مترمربع)	$۹۱۰۰ \div ۱۷۶/۷۱۴ = ۵۱/۵۲۸$

جدول ۴-۱۷ : محاسبات اضافه بار بر نمونه استوانه و تیر

آزمایش مقاومت خمشی		آزمایش مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم	
نمونه (سانتیمتر)	استوانه : قطر ۱۰-ارتفاع ۲۰	نمونه (سانتیمتر)	تیر : ۱۰ - ۱۰ - ۳۵
تنش (گرم/سانتی مترمربع)	۵۱/۵۲۸	تنش (گرم/سانتی مترمربع)	۵۱/۵۲۸
سطح تنش (سانتی مترمربع)	$۳/۱۴ \times ۵ \times ۵ = ۷۸/۵۳۹$	سطح تنش (سانتی مترمربع)	$۳۵ \times ۱۰ = ۳۵۰$
اضافه بار (گرم)	$۵۱/۵۲۸ \times ۷۸/۵۳۹ = ۴۰۴۶/۹۵۷$	اضافه بار (گرم)	$۵۱/۵۲۸ \times ۳۵۰ = ۱۸۰۳۵$



شکل ۴-۲۰ : وزنه سربار نمونه استوانه



شکل ۴-۲۱ : وزنه سربار نمونه تیری

برای انجام این آزمایش ابتدا داخل قالب را با قلمو روغن کاری نموده ایم. قالب را روی میز ویبره و درست در مرکز آن قرار می دهیم. به میزان کافی بتن در داخل قالب میریزیم بطوری که بتن بعد از متراکم شدن یک سوم حجم قالب را پر نماید. میز لرزه را روشن می کنیم و اجازه می دهیم بتن تحت بار سربار تحت تحکیم قرار گیرد. در هنگام تحکیم نمونه، ملات فضای حلقوی بین لبه خارجی سربار و جداره داخلی قالب را پر می کند. تا هنگام تشکیل یک حلقه در سراسر محیط سربار به دقت به مشاهده خود ادامه می دهیم. هنگامی که این حلقه به طور کامل در دور سربار ایجاد شد میز لرزه را خاموش می کنیم، البته که زمان دقیق تشکیل حلقه ملات بصورت تجربی تعیین می شود و برای نمونه های تیر بدلیل سطح مقطع بزرگتر از استوانه نیاز به زمان بیشتری دارد. اگر دانه های سنگی درشت از تشکیل حلقه ملات در یک قسمت کوچک جلوگیری می کند طوری که در دیگر نقاط این حلقه شکل گرفته است میز لرزه را می توان متوقف نمود و لایه بعدی بتن را داخل قالب ریخت. اگر بخش قابل توجهی از حلقه ملات تشکیل نشد، نشان می دهد که بتن دارای ملات مناسبی نمی باشد که این موضوع می تواند ناشی از نمونه گیری غلط، جدا شدگی و طرح اختلاط نامناسب بوده است. مراحل قبلی برای لایه دوم و سوم بتن نیز تکرار می گردد. تنها در مورد لایه سوم قالب را بیشتر از ظرفیتش و بصورت تپه ای پر می نماییم. بعد از اینکه استفاده از سربار به اتمام رسید (سطح مناسب حاصل شد) نمونه را به مدت ۳ تا ۵ ثانیه بدون سربار تحت لرزه قرار خواهیم داد تا درزها و حفرات ریز نیز پر شوند و سطحی آینه ای و صیقلی حاصل شود. پس از ۲۴ ساعت نمونه ها از درون قالب خارج و در آب قابل شرب آزمایشگاه و در دمای 20 ± 2 سانتی گراد در زمان ۷ روز نگهداری گردید.

۴-۴-۴ روش عمل آوری نمونه ها:

نمونه های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت داخل قالب جهت عمل آوری نگهداری می شوند و سپس قالب ها باز شده و تا زمان تست درون ظرف پر آب قرار داده می شوند.

۴-۴-۵ ساخت نمونه مقاومت فشاری و نمونه مقاومت کششی غیر مستقیم:

در این تحقیق، نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر (شکل ۴-۲۲) پس از ساخت و عمل آوری در سنین ۷ روز در آب، درون دستگاه تعیین مقاومت فشاری قرار گرفتند و توسط این دستگاه مقاومت هر یک از نمونه ها به دست آمد. این دستگاه یک جک هیدرولیکی می باشد. نرخ بارگذاری این جک برابر ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه است. برای هر یک از طرح اختلاط ها ۳ نمونه ساخته شده و میانگین مقاومت فشاری/کششی غیرمستقیم این سه نمونه در ارائه نتایج استفاده شد [۸۲] و [۸۳].



شکل ۴-۲۲: قالب نمونه استوانه

طرح اختلاط مربوط به نمونه مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم (نمونه استوانه ایی) با درصد رطوبت بهینه ۸ درصد برای مصالح سنگی مطابق جدول ۴-۱۸ می باشد.

جدول ۴-۱۸: روابط مرتبط با محاسبه وزن مصالح طبیعی نمونه استوانه ای

نمونه شاهد ۱۰۰٪ مصالح طبیعی (R.S.A1۰۰C۰)	
$X + ۰/۱۸۸(X) + ۰/۰۸X = ۲۵۰۰$	
۰/۰۸	درصد رطوبت مصالح
۰/۱۸۸	درصد سیمان، بعنوان درصدی از مصالح Agg
۱۹۷۱/۶۰۸	وزن مخصوص مصالح Magg - x

استوانه ۱۰-۲۰ سانتیمتر	نمونه مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم
مترمکعب ۰/۰۰۱۵۷۰	حجم قالب
کیلوگرم $۱۹۷۱/۶ \times ۰/۰۰۱۵ = ۳/۰۹۶۹$	مصالح مورد نیاز قالب
کیلوگرم $۰/۱۸۸ \times ۱۹۷۱/۶ \times ۰/۰۰۱۵ = ۰/۵۸۱۹$	سیمان
کیلوگرم $۰/۰۸ \times ۱۹۷۱/۶ \times ۰/۰۰۱۵ = ۰/۲۴۷$	آب
$۰/۲۴۷ \div ۰/۵۸۱ = ۰/۴۲$	نسبت آب به سیمان

حال با داشتن وزن مخصوص و حجم قالب، مصالح مورد نیاز قالب مشخص شده‌ف اکنون می توان درصد عبوری از هر الک را برای ساخت نمونه استوانه ای محاسبه و وزن مانده روی هر الک را به تفکیک مشخص کرد:

وزن مانده روی هر الک = درصد مانده مصالح روی هر الک بصورت مجزا $\times$ مصالح مورد نیاز قالب

جدول ۴-۱۹: درصد وزنی مصالح طبیعی نمونه استوانه ۱۰ $\times$ ۲۰

شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی	درصد کل مصالح مانده	درصد مانده مصالح روی هر الک به صورت	وزن کل مصالح (گرم)
		حد بالا	حد پایین				
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
۰/۷۵ (۳/۴)	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸	۲	۲	۶۱/۹۴
۰/۵ (۱/۲)	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷	۱۳	۱۱	۳۴۰/۶۹
۰/۳۷۵ (۳/۸)	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹	۲۱	۸	۲۴۷/۷۶
#۴	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹	۳۱	۱۰	۳۰۹/۷۰
#۸	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸	۶۲	۳۱	۹۶۰/۰۶
#۱۶	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸	۷۲	۱۰	۳۰۹/۷۰
#۳۰	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸	۸۲	۱۰	۳۰۹/۷۰
#۵۰	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱	۸۹	۷	۲۱۶/۷۹
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۸	۶	۶	۹۴	۵	۱۵۴/۸۵
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۸	۲	۲	۹۸	۴	۱۲۳/۸۸
pan	۰				۱۰۰	۲	۶۱/۹۴
							۳۰۹۶/۹۸

برای ساخت این نمونه ها، ابتدا مصالح مورد نیاز را وزن کشی کرده و در مخلوط کن می ریزیم و پس از مخلوط کردن و بتن ریزی، تراکم در سه لایه انجام می گیرد.



شکل ۴-۲۳: مخلوط نهایی نمونه استوانه



شکل ۴-۲۴ : نمونه استوانه بتن غلتکی

۴-۴-۶ ساخت نمونه های مقاومت خمشی :

مطابق استاندارد ASTM C78 نمونه ها از نوع منشوری با ابعاد $350 \times 100 \times 100$ میلی متر (شکل ۴-۲۵) ساخته شدند. برای هر یک از طرح اختلاط ها ۳ نمونه ساخته شده و میانگین مقاومت خمشی این سه نمونه در ارائه نتایج استفاده شد [۸۴].



شکل ۴-۲۵ : قالب نمونه تیر

طرح اختلاط مربوط به نمونه مقاومت خمشی (نمونه منشوری) با درصد رطوبت بهینه ۸ درصد برای مصالح سنگی مطابق جدول ۴-۲۰ می باشد.

جدول ۴-۲۰: روابط مرتبط با محاسبه وزن مصالح طبیعی نمونه تیر

نمونه شاهد ۱۰۰٪ مصالح طبیعی (R.S.A.100.C0)	
$X + 0.188(X) + 0.08X = 2500$	
۰/۰۸	درصد رطوبت مصالح
۰/۱۸۸	درصد سیمان، بعنوان درصدی از مصالح Agg
۱۹۷۱/۶۰۸	وزن مخصوص مصالح Magg - X

تیر منشوری ۱۰-۱۰-۳۵ سانتیمتر	نمونه مقاومت خمشی
۰/۰۰۳۵ متر مکعب	حجم قالب
کیلوگرم $1971/6 \times 0.0035 = 6/9006$	مصالح مورد نیاز قالب
کیلوگرم $0.188 \times 1971/6 \times 0.0035 = 1/2973$	سیمان
کیلوگرم $0.08 \times 1971/6 \times 0.0035 = 0/552$	آب
$0/552 \div 1/2973 = 0/42$	نسبت آب به سیمان

حال با داشتن وزن مخصوص و حجم قالب، مصالح مورد نیاز قالب مشخص شد. اکنون می توان درصد عبوری از هر الک را برای ساخت نمونه منشوری محاسبه و وزن مانده روی هر الک را به تفکیک مشخص کرد:

وزن مانده روی هر الک = درصد مانده مصالح روی هر الک بصورت مجزا $\times$ مصالح مورد نیاز قالب

جدول ۴-۲۱: درصد وزنی مصالح طبیعی نمونه تیر منشوری ۱۰ × ۱۰ × ۳۵

شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی	درصد کل مصالح مانده	درصد مانده مصالح روی هر الک به صورت مجزا	وزن کل مصالح (گرم)
		حد بالا	حد پایین				
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
۰/۷۵ (۳/۴)	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸	۲	۲	۱۳۸/۰۱
۰/۵ (۱/۲)	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷	۱۳	۱۱	۷۵۹/۰۷
۰/۳۷۵ (۳/۸)	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹	۲۱	۸	۵۵۲/۰۵
#۴	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹	۳۱	۱۰	۶۹۰/۰۶
#۸	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸	۶۲	۳۱	۲۱۳۹/۱۹
#۱۶	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸	۷۲	۱۰	۶۹۰/۰۶
#۳۰	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸	۸۲	۱۰	۶۹۰/۰۶
#۵۰	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱	۸۹	۷	۴۸۳/۰۴
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۸	۶	۶	۹۴	۵	۳۴۵/۰۵
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۸	۲	۲	۹۸	۴	۲۷۶/۰۲
pan	۰				۱۰۰	۲	۱۳۸/۰۱
							۶۹۰۰/۶



شکل ۴-۲۶: مخلوط نهایی نمونه تیر



شکل ۴-۲۷: نمونه تیری بتن غلتکی

۴-۴-۷ ساخت نمونه های پژوهش با مصالح جایگزین :

همانطور که می دانیم در طرح اختلاط این تحقیق مصالحی جایگزین مصالح سنگی شدند. سرباره کوره و آسفالت بازیافتی در قسمت درشت دانه از الک شماره ۴ به بالا (۱ - $\frac{3}{4}$ - $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{8}$ - ۴ #) با درصدهای مختلف استفاده شدند همچنین از پودر لاستیک در قسمت ریزدانه زیر الک شماره ۴ (۴ - ۸ - ۱۶ - ۳۰ - ۵۰ #) با درصدهای مختلف استفاده شد. با توجه به اینکه وزن مخصوص نسبی مصالح جایگزین متفاوت از وزن مخصوص نسبی مصالح طبیعی است، ابتدا مطابق جدول ۴-۲۲ وزن مخصوص نسبی مصالح را محاسبه می کنیم. در طرح اختلاط ها درصدهای جایگزین بصورت حجمی در نظر گرفته شده اند.

جدول ۴-۲۲ : وزن مخصوص نسبی مصالح جایگزین

وزن مخصوص نسبی مصالح سنگی درشت دانه	p AGG-fine	۲/۶۱
وزن مخصوص نسبی مصالح سنگی ریزدانه	p AGG-coarse	۲/۶۶
وزن مخصوص نسبی RAP درشت دانه	p RAP-coarse	۲/۵۹
وزن مخصوص نسبی Slag درشت دانه	p Slag-coarse	۳/۴۶
وزن مخصوص نسبی پودر لاستیک ریزدانه	p Rubber-fine	۰/۷۵

همچنین از آنجایی که درصد جذب آب مصالح جایگزین متفاوت از مصالح طبیعی است به مقدار آب طرح اختلاط مقدار اختلاف مورد نظر افزوده یا کاسته شد.

جدول ۴-۲۳ : درصد جذب

۰/۴	مصالح طبیعی
۱/۲۵	سرباره
۰/۸	آسفالت بازیافتی

به منظور دسترسی راحت تر به نام نمونه های ساخته شده، نمونه ها را بصورت اختصار نامگذاری می کنیم.

جدول ۴-۲۴ : نام اختصاری نمونه ها

نمونه 100% مصالح طبیعی	100% AGG
درصد استفاده شده از آسفالت بازیافتی (RAP)	%RAP
درصد استفاده شده از سرباره (SLAG)	%Slag
درصد استفاده شده از پودر لاستیک (Crumb Rubber)	%Rubber

برای مثال نمونه دارای ۵۰ درصد آسفالت بازیافتی و ۲۵ درصد سرباره و ۱۰ درصد پودر لاستیک بصورت زیر معرفی می گردد.

50%RAP25%Slag-10%Rubber

طرح اختلاط نمونه های دارای مصالح جایگزین همانند جدول درصد وزنی مصالح بوده که اگر مصالح مورد نیاز قالب را در آن ضرب کنیم، وزن مانده روی هر الک همانند قبل بدست می آید حال برای جایگزین کردن مصالح به آسفالت بازیافتی یا سرباره و یا پودر لاستیک، در ابتدا درصد های مورد نظر را بصورت وزنی از وزن کل روی هر الک جدا می کنیم و سپس با داشتن وزن مخصوص مصالح جایگزین و مصالح سنگی محاسبات وزنی را به حجمی تبدیل می کنیم.

برای مثال طرح اختلاط یک نمونه استوانه و یک نمونه تیر با درصد های ۵۰٪ RAP – ۳۵٪ Slag – ۱۵٪ Rubber بصورت زیر گزارش شده است.

جدول ۴-۲۵ : درصد وزنی مصالح نمونه استوانه ای

محاسبه درصد وزنی مصالح سنگی						نمونه استوانه ۱۰*۲۰	
شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی	درصد کل مصالح مانده	درصد مانده مصالح روی هر الک به صورت	وزن کل مصالح (گرم)
		حد بالا	حد پایین				
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
۰/۷۵(۳/۴)	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸	۲	۲	۶۱/۹۴
۰/۵(۱/۲)	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷	۱۳	۱۱	۳۴۰/۶۹
۰/۳۷۵(۳/۸)	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹	۲۱	۸	۲۴۷/۷۶
#۴	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹	۳۱	۱۰	۳۰۹/۷۰
#۸	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸	۶۲	۳۱	۹۶۰/۰۶
#۱۶	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸	۷۲	۱۰	۳۰۹/۷۰
#۳۰	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸	۸۲	۱۰	۳۰۹/۷۰
#۵۰	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱	۸۹	۷	۲۱۶/۷۹
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۸	۶	۶	۹۴	۵	۱۵۴/۸۵
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۸	۲	۲	۹۸	۴	۱۲۳/۸۸
pan	۰				۱۰۰	۲	۶۱/۹۴
							۳۰۹۶/۹۸

جدول ۴-۲۶ : درصد حجمی مصالح نمونه استوانه

نمونه استوانه ای قطر ۱۰ – ارتفاع ۲۰ حجم استوانه ۰/۰۰۱۵۷۱ مترمکعب							
وزن کل مصالح (گرم)	جایگزین ریزدانه پودر لاستیک (گرم)	پودر لاستیک - حجمی (p rubber/p agg)	جایگزین دوم درشت دانه سرباره (گرم)	سرباره - حجمی (p slag/p agg)	جایگزین اول درشت دانه RAP - گرم	RAP (p rap/p agg) حجمی	مصالح سنگدانه (گرم)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶۱/۹۴	۰	۰	۱۰/۸۴	۱۴/۱۰	۳۰/۹۷	۳۰/۱۵	۲۰/۱۳
۳۴۰/۶۷	۰	۰	۵۹/۶۲	۷۷/۵۵	۱۷۰/۳۳	۱۶۵/۸۵	۱۱۰/۷۲
۲۴۷/۷۶	۰	۰	۴۳/۳۵	۵۶/۴۰	۱۲۳/۸۸	۱۲۰/۶۲	۸۰/۵۲
۳۰۹/۷	۴۶/۴۵	۱۳/۳۵	۳۷/۹۴	۴۹/۳۵	۱۵۴/۸۵	۱۵۰/۷۷	۷۰/۴۵
۹۶۰/۰۶	۱۴۴	۴۱/۳۸	۰	۰	۰	۰	۸۱۶/۰۵
۳۰۹/۷	۴۶/۴۵	۱۳/۳۵	۰	۰	۰	۰	۲۶۳/۲۴
۳۰۹/۷	۴۶/۴۵	۱۳/۳۵	۰	۰	۰	۰	۲۶۳/۲۴
۲۱۶/۷۹	۳۲/۵۲	۹/۳۵	۰	۰	۰	۰	۱۸۴/۲۷
۱۵۴/۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵۴/۸۵
۱۲۳/۸۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۳/۸۸
۶۱/۹۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۱/۹۴
۳۰۹۶/۹۸		۹۰/۷۷		۱۹۷/۳۹		۴۶۷/۴۰	۲۱۴۹/۳۱
				۲۹۰۴/۸۷			

جدول ۴-۲۷: آب اضافی نمونه استوانه

سیمان - گرم	۵۸۲/۲۴
مقدار آب - گرم	۲۴۷/۷۶
آب اضافی سرباره - گرم	$1/677 = ((197/39) \times \text{مجموع وزن سرباره} \times (100 \div (1/25 - 0/4)))$
آب اضافی RAP - گرم	$1/86 = (467/4) \times \text{RAP مجموع وزن} \times (100 \div (0/8 - 0/4))$
مقدار آب نهایی - گرم	$247/76 + 1/677 + 1/86 = 251/3$

جدول ۴-۲۸: درصد وزنی مصالح نمونه تیری

محاسبه درصد وزنی مصالح سنگی						نمونه تیر ۱۰*۱۰*۳۵	
شماره الک	سایز الک (میلیمتر)	محدوده دانه بندی آیین نامه ACI		درصد عبوری انتخابی	درصد کل مصالح مانده	درصد مانده مصالح روی هر الک به صورت مجزا	وزن کل مصالح (گرم)
		حد بالا	حد پایین				
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
۰/۷۵(۳/۴)	۱۹	۱۰۰	۸۳	۹۸	۲	۲	۱۳۸/۰۱
۰/۵(۱/۲)	۱۲/۵	۹۳	۷۲	۸۷	۱۳	۱۱	۷۵۹/۰۷
۰/۳۷۵(۳/۸)	۹/۵	۸۵	۶۶	۷۹	۲۱	۸	۵۵۲/۰۵
#۴	۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۹	۳۱	۱۰	۶۹۰/۰۶
#۸	۲/۳۶	۵۶	۳۸	۳۸	۶۲	۳۱	۲۱۳۹/۱۹
#۱۶	۱/۱۸	۴۶	۲۸	۲۸	۷۲	۱۰	۶۹۰/۰۶
#۳۰	۰/۶	۳۶	۱۸	۱۸	۸۲	۱۰	۶۹۰/۰۶
#۵۰	۰/۳	۲۷	۱۱	۱۱	۸۹	۷	۴۸۳/۰۴
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۸	۶	۶	۹۴	۵	۳۴۵/۰۵
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۸	۲	۲	۹۸	۴	۲۷۶/۰۲
pan	۰				۱۰۰	۲	۱۳۸/۰۱
							۶۹۰۰/۶

جدول ۴-۲۹: درصد حجمی مصالح نمونه تیری

نمونه تیر ۱۰×۱۰×۳۵ گرم - ۰.۰۳۵ مترمکعب							
وزن کل مصالح (گرم)	جایگزین ریزدانه پودر لاستیک	پودر لاستیک - حجمی	جایگزین دوم درشت دانه	سرباره - حجمی (p slag/p agg)	جایگزین اول درشت دانه RAP - گرم	p rap/p agg حجمی RAP	مصالح سنگدانه (گرم)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳۸/۰۱	۰	۰	۲۴/۱۵	۳۱/۴۲	۶۹	۶۷/۱۹	۴۴/۸۵
۷۵۹/۰۷	۰	۰	۱۳۲/۸۴	۱۷۲/۷۹	۳۷۹/۵۳	۳۶۹/۵۴	۲۴۶/۷۰
۵۵۲/۰۵	۰	۰	۹۶/۶۱	۱۲۵/۶۶	۲۷۶/۰۲	۲۶۸/۷۶	۱۷۹/۴۱
۶۹۰/۰۶	۱۰۳/۵۱	۲۹/۷۴	۸۴/۵۳	۱۰۹/۹۶	۳۴۵/۰۳	۳۳۵/۹۵	۱۵۶/۹۹
۲۱۳۹/۱۹	۳۲۰/۸۸	۹۲/۲۱	۰	۰	۰	۰	۱۸۱۸/۳۱
۶۹۰/۰۶	۱۰۳/۵۱	۲۹/۷۴	۰	۰	۰	۰	۵۸۶/۵۵
۶۹۰/۰۶	۱۰۳/۵۱	۲۹/۷۴	۰	۰	۰	۰	۵۸۶/۵۵
۴۸۳/۰۴	۷۲/۴۶	۲۰/۸۲	۰	۰	۰	۰	۴۱۰/۵۹
۳۴۵/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۴۵/۰۳
۲۷۶/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۷۶/۰۲
۱۳۸/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۸/۰۱
۶۹۰۰/۶		۲۰۲/۲۶		۴۳۹/۸۲		۱۰۴۱/۴۵	۴۷۸۹/۰۲
	۶۴۷۲/۵۴						

جدول ۴-۳۰: اضافه آب نمونه تیر

سیمان - گرم	۱۲۹۷/۳۲
مقدار آب - گرم	۵۵۲/۰۵
آب اضافی سرباره - گرم	$3/73 = ((439/82) \times \text{مجموع وزن سرباره} \times (100 \div (1/25 - 0/4)))$
آب اضافی RAP - گرم	$4/16 = (1041/45) \times \text{مجموع وزن RAP} \times (100 \div (0/8 - 0/4))$
مقدار آب نهایی - گرم	$552/05 + 3/73 + 4/16 = 559/94$

در آزمایشگاه کلیه نمونه ها با ۱۰ درصد خطا ساخته شدند تا مصالحی که طی طرح اختلاط و مخلوط هدر می روند تقریباً جبران شود. در ضمن در هر بار ساخت در آزمایشگاه یا ۲ استوانه و یا یک تیر ساخته و عمل آوری شدند.



شکل ۴-۲۸: نمونه های نهایی تیر و استوانه

در این تحقیق سعی شده است که تا جای ممکن درصد استفاده از مصالح جایگزین را بالا ببریم، بر همین اساس در ابتدا با هدف رسیدن به حد نهایی کارهای صورت گرفته، شروع به ساخت نمونه کردیم و از ماکزیمم مقداری که پژوهشگران در تحقیقات خود استفاده کرده بودند، بهره بردیم. در گام دوم با ترکیب مصالح جایگزین و یافتن نقاط ضعف برخی مصالح و پوشش دادن آن با مصالح جایگزین دیگر، برای رسیدن به طرح اختلاط هایی با درصدهای فراتر از کارهای صورت گرفته، شروع به ساخت نمونه کردیم و به حداکثر درصدی که میتوان از مصالح جایگزین بازیافتی استفاده کرد و شرط های بتن غلتکی را نیز ارضا کند، دست یافتیم. جدول زیر در یک نگاه کلی، تمامی طرح اختلاط های ساخته شده در این تحقیق (حدوداً ۲۴ طرح اختلاط مختلف و ۷۲ نمونه ساخته شده) را نشان می دهد که برای هر طرح اختلاط خاص آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم صورت گرفته است که در فصل بعدی طبقه انجام آزمایشها و نتایج آن ها بطور مفصل شرح داده شده است.

جدول ۴-۳۱: نمونه های ساخته شده در پژوهش

ردیف	طرح اختلاط	ردیف	طرح اختلاط	ردیف	طرح اختلاط	ردیف	طرح اختلاط
۱	۱۰۰%Agg	۷	۷۰%RAP	۱۳	۷۰%RAP-۲۵%S lag	۱۹	۵۰%RAP-۲۵%S lag-۱۵%Rubber
۲	۱۰%Rubber	۸	۱۰۰%RAP	۱۴	۱۰۰%RAP-۱۵%Rubber	۲۰	۵۰%RAP-۳۵%S lag-۱۵%Rubber
۳	۱۵%Rubber	۹	۲۵% S lag	۱۵	۱۰۰%RAP-۳۰%Rubber	۲۱	۵۰%RAP-۴۵%S lag-۱۵%Rubber
۴	۵۰%Rubber	۱۰	۳۵% S lag	۱۶	۱۰%Rubber-۲۵%S lag	۲۲	۶۰%RAP-۲۵%S lag-۱۰%Rubber
۵	۵۰%RAP	۱۱	۵۰%RAP-۲۵%S lag	۱۷	۱۰%Rubber-۳۵%S lag	۲۳	۶۰%RAP-۳۵%S lag-۱۰%Rubber
۶	۶۰%RAP	۱۲	۶۰%RAP-۲۵%S lag	۱۸	۵۰%RAP-۲۵%S lag-۱۰%Rubber	۲۴	۱۰۰%RAP-۲۵%S lag-۱۰%Rubber

در مورد درصدهایی که از مصالح جایگزین گرفته شده است در فصل بعدی توضیح داده خواهد شد و هدف از این جدول فقط دادن یک شمای کلی و دسته بندی نمونه برحسب مصالح جایگزین می باشد.

نحوه انجام آزمایش ها و بیان نتایج

راهنمای روسازی بتنی غلتکی RCCP بیان می کند که مقاومت فشاری و خمشی RCC به طور معمول، بترتیب از ۲۸ تا ۴۱ مگاپاسکال و ۳/۵ تا ۷ مگاپاسکال در ۲۸ روز بدست می آید [۵]. در این فصل به نحوه انجام آزمایشهای مذکور به همراه نتایج بدست آمده از آن ها اشاره می شود. در ادامه فصل استانداردهای مربوط به آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای و آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بیان می گردد، مدول الاستیسیته برای نمونه ها طبق رابطه بیان شده در فصل ۲ براساس مقاومت فشاری محاسبه شده و در انتها نتایج حاصل از آزمایش ها بحث و بررسی می شوند.

۵-۱ آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

در این آزمایش طبق استاندارد ASTM C39-86 با اعمال بار فشاری بر روی نمونه های استوانه ای بتنی که بصورت ایستاده در زیر دستگاه جک فشاری قرار می گیرد، نمونه ها گسیخته می شوند. مقاومت فشاری وارده بر نمونه از حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه بر سطح مقطع آن بدست می آید.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{رابطه ۵-۱:}$$

σ = مقاومت فشاری (کیلوگرم بر مترمکعب)

F = نیروی فشاری وارده از دستگاه مقاومت فشاری (کیلوگرم)

A = سطح مقطع نمونه (مترمربع)

نمونه مورد قبول استاندارد، استوانه به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر بوده و نرخ بارگذاری باید بصورت ثابت و در محدوده ۰/۱ میلی متر بر دقیقه باشد [۸۲]. در این پژوهش نمونه ها پس از ۷ روز عمل آوری در حوضچه آب، مورد آزمایش قرار گرفتند. از آنجایی که برحسب ضابطه ۷۳۱ باید حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۵ مگاپاسکال و آیین نامه آمریکا ۲۷/۶ مگاپاسکال باشد و آزمایشها بعد از ۷ روز انجام شدند، به کمک مبحث نهم مقررات ملی و با استفاده از جدول زیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه را می توان از مقاومت فشاری ۷ روزه بدست آورد [۸۵].

جدول ۵-۱: تبدیل نوع سیمان و سن بتن بر روی مقاومت فشاری نسبی بتن [۸۵]

نوع سیمان	یک روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
سیمان تیپ ۱	۰/۳	۰/۶۶	۱	۱/۲
سیمان تیپ ۲	۰/۲۳	۰/۵۶	۰/۹	۱/۲
سیمان تیپ ۳	۰/۵۷	۰/۷۹	۱/۱	۱/۲
سیمان تیپ ۴	۰/۱۷	۰/۴۳	۰/۷۵	۱/۲
سیمان تیپ ۵	۰/۲	۰/۵	۰/۸۵	۱/۲

طریقه قرارگرفتن نمونه ها داخل دستگاه باید بشکل زیر و جهت بارگذاری عمود بر سطح بتن ریزی باشد.



شکل ۵-۱: نمونه عمل آوری شده استوانه



شکل ۵-۲: دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

شکل های گسیختگی نمونه ها غالبا به صورت زیر بوده و ترک خوردگی و گسیختگی در این آزمایش به این شکل رخ می دهد.



شکل ۵-۳: نمونه استوانه پس از آزمایش مقاومت فشاری

شرط آنکه نمونه ای بتواند مورد قبول آیین نامه بتن غلتکی باشد آنست که همزمان مقاومت فشاری و مقاومت خمشی آن حداقل های مورد نیاز را کسب کنند. در این پژوهش نمونه ای که فقط یکی از شرط ها را ارضا کند مورد قبول نخواهد بود و طرح اختلاط رد خواهد شد.

محاسبه ضریب الاستیسیته براساس رابطه بیان شده در بخش ۲-۴-۶-۴ برحسب مقاومت فشاری بتن محاسبه می شود. روند تغییرات مدول الاستیسیته رابطه مستقیمی با مقاومت فشاری داشته و با افزایش یا کاهش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته نیز افزایش یا کاهش می یابد.

$$E_c = 4770\sqrt{f_c}$$

E_c : ضریب الاستیسیته بتن برحسب مگاپاسکال

f_c : مقاومت فشاری نمونه استوانه ای برحسب مگاپاسکال

۵-۲ نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته:

طریقه دسته بندی نمونه ها ابتدا براساس حداکثر درصدی است که پژوهشهای قبلی انجام دادند و در صورتی که نتیجه مورد قبول باشد یک گام فراتر رفته و حداکثر درصدی که بتوان از ماده جایگزین استفاده کرد، یافته شده است.

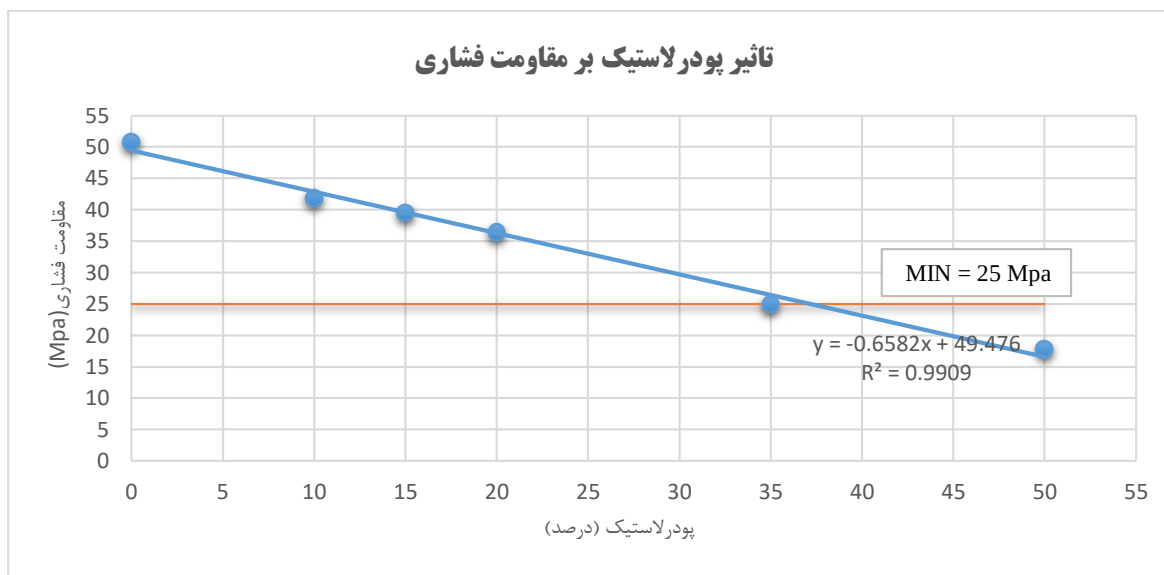
۵-۲-۱ تاثیر پودر لاستیک بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

پژوهش های قبلی به حداکثر درصدی که برای پودرلاستیک رسیده بودند، مقدار ۱۰ درصد جایگزین ریزدانه بوده است. پودرلاستیک با درصدهایی که در جدول ۵-۲ ذکر شده جایگزین ریزدانه (الک های شماره ۴، ۸، ۱۶، ۳۰، ۵۰) در طرح اختلاط شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۵-۲ نشان داده شده است. بنابر نتایج حداکثر درصدی که می توان از پودرلاستیک نتیجه گرفت ۳۵٪ می باشد و درصدهای بالاتر مقاومت فشاری ۲۸ روزه درصدی کمتر از ۲۵ مگاپاسکال خواهند داشت. این درصد زمانی مورد تایید RCC می باشد که حداقل مقاومت خمشی را نیز ارضا کند.

جدول ۵-۲ : مقاومت فشاری و مدول پودر لاستیک

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰	۳۱/۶	۵۰/۷۸	۳۳/۹۹
۱۰	۲۶	۴۱/۷۹	۳۰/۸۳
۱۵	۲۴/۶	۳۹/۵۴	۲۹/۹۹
۲۰	۲۲/۶۴	۳۶/۴	۲۸/۷۹
۳۵	۱۵/۵۵	۲۵	۲۳/۸۵
۵۰	۱۱/۰۶	۱۷/۷۷	۲۰/۱۱

روند اثرگذاری پودرلاستیک جایگزین ریزدانه در شکل ۴-۵ نشان داده است. مطابق نمودار با افزایش پودر لاستیک، مقاومت فشاری کاهش می یابد. در واقع با توجه به وزن مخصوص کم، دانه های لاستیکی در هنگام عمل ویبره تمایل حرکت به سمت بالا را دارند و در نتیجه سبب افت شدید مقاومت فشاری می شود. از طرفی چسبندگی کمتر بین دانه های لاستیک و مصالح در مقایسه با بتن غلتکی معمولی می تواند مقاومت فشاری را کاهش دهد. همچنین پودرلاستیک دارای نرمی بیشتری نسبت به مصالح سنگدانه دارد، مزیدی بر علت خواهد بود که در هنگام اعمال بارفشاری، ترکها سریعا در داخل نمونه شکل گرفته و با افزایش مقدار بار گسترش یابند.



شکل ۴-۵: نمودار مقاومت فشاری - پودرلاستیک

۵-۲-۲ تأثیر آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته:

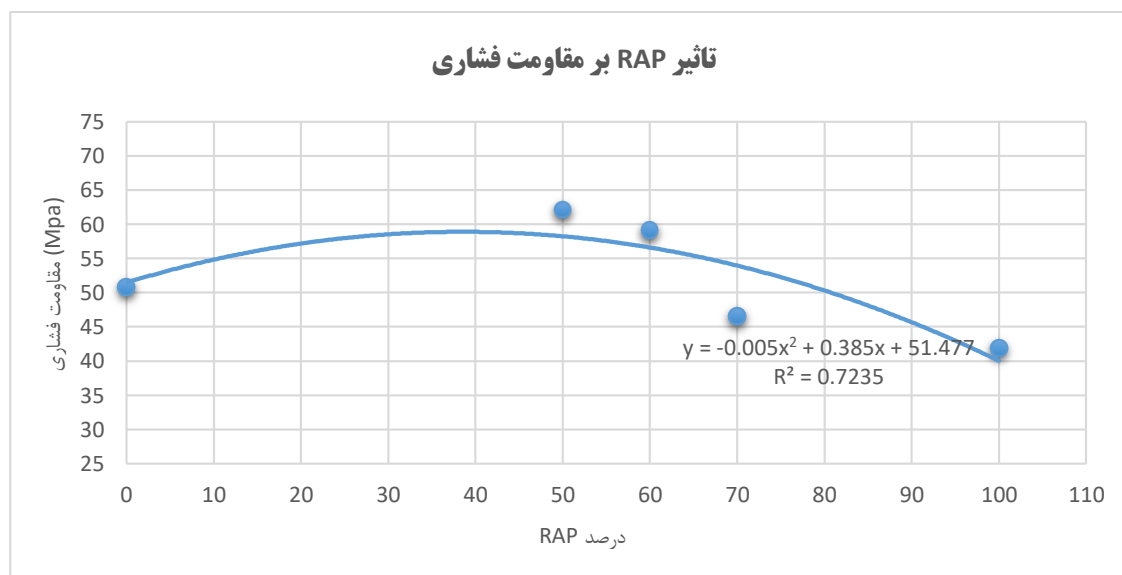
پژوهشهای قبلی به حداکثر درصدی که برای آسفالت بازیافتی رسیده بودند، مقدار ۵۰ درصد جایگزین درشت دانه بوده است. آسفالت بازیافتی RAP با درصدهایی که در جدول ۳-۵ ذکر شده جایگزین درشت دانه در طرح اختلاط شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۳-۵ نشان داده شده است. بنابر نتایج، ۱۰۰ درصد RAP می تواند جایگزین درشت دانه شود و این درصد زمانی مورد قبول است که حداقل مقاومت خمشی را نیز ارضا کند. حضور RAP عملکرد بتن غلتکی را کاهش داده و مقاومت فشاری را کاهش می دهد. اگرچه روش تراکم تأثیر زیادی بر استحکام می گذارد ولی چسبندگی بین ذرات و ملات سیمان بسیار مهم است. چسبندگی ای که بین مصالح سنگدانه و سیمان وجود دارد در حالت استفاده از RAP بدلیل وجود گرد و غبار روی مصالح آسفالتی و حضور قیر چسبیده شده به مصالح اتفاق نمی افتد. مقدار قیر متصل شده به ذرات RAP، تراکم کمتر و حضور و تجمع لایه آلاینده و غبار در اطراف مصالح RAP ظرفیت بیشتری برای جذب آب ایجاد می کند. با افزایش محتوای RAP، مقدار هوا افزایش یافته و درصد جذب آب RAP بیشتر از درصد جذب آب مصالح طبیعی

شده به همین دلیل با افزایش محتوای RAP درصد رطوبت بهینه افزایش پیدا کرده و به تبع نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می کند. استفاده از RAP تا ۶۰٪ موجب افزایش مقاومت فشاری شده بطوریکه RAP ۵۰٪ حداکثر مقاومت فشاری را نتیجه داده است، عملکرد مثبت RAP را می توان به قیر پیر شده موجود در آسفالت نسبت داد که توانسته تا حدی علاوه بر پوشاندن ضعفهای RAP موجب عملکرد بهتر آن شود. پیرشدگی موجب سخت تر شدن قیر می شود و میزان پیرشدگی در قیرهای مختلف متفاوت است، اما نه تنها نوع قیر بلکه نوع سنگدانه نیز در میزان آن موثر است. پدیده پیرشدگی لزوماً یک پدیده منفی نیست. چرا که مقدار کمی پیرشدگی موجب می شود که خصوصیات مخلوط بهینه شود. از درصد ۶۰ به بالا مقاومت از مقاومت نمونه شاهد کمتر شده ولی تا ۱۰۰ درصد حداقل مقاومت موردنیاز بتن غلتکی را ارضا می کند.

جدول ۵-۳: مقاومت فشاری و مدول آسفالت بازیافتی

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰	۳۱/۶	۵۰/۷۸	۳۳/۹۹
۵۰	۳۸/۶۴	۶۲/۱	۳۷/۵۹
۶۰	۳۶/۷۴	۵۹/۰۵	۳۶/۶۵
۷۰	۲۸/۹۷	۴۶/۵۶	۳۲/۵۵
۱۰۰	۲۹/۷۵	۴۱/۸۱	۳۰/۸۴

روند صعودی-نزولی آسفالت بازیافتی در شکل ۵-۵ نشان داده است.



شکل ۵-۵: نمودار آسفالت بازیافتی - مقاومت فشاری

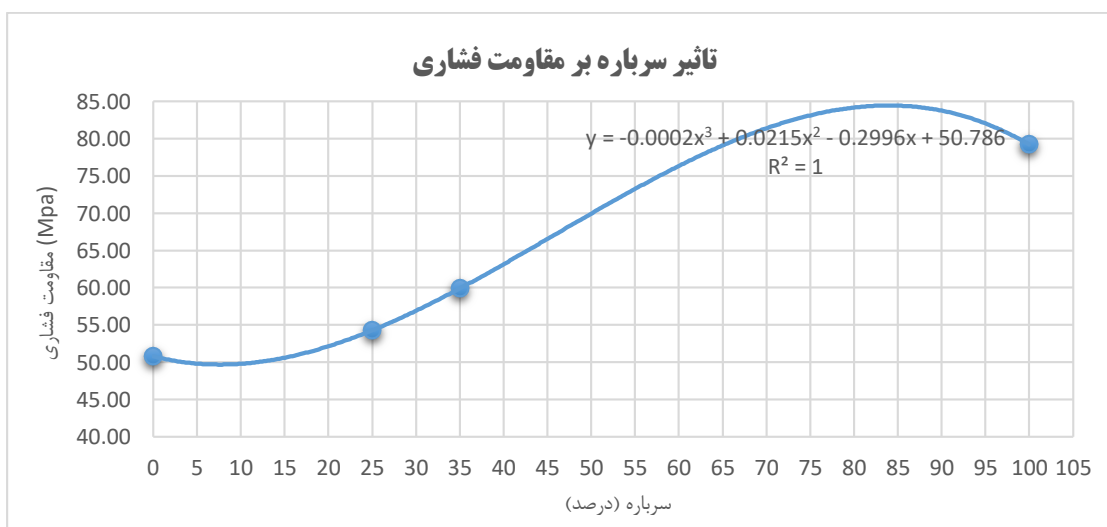
۵-۲-۳ تأثیر سرباره (Slag) بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

در پژوهش های قبلی سرباره در جایگزینی با مصالح طبیعی نقش مثبت داشته و با افزایش مقدار آن در طرح اختلاط موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. سرباره دارای وزن مخصوص بالاتری از مصالح طبیعی است و بدلیل وجود حفرات موجود در آن، جذب آب بالاتری نیز دارد. سرباره با درصدهایی که در جدول ۴-۵ ذکر شده به عنوان جایگزین دوم درشت دانه (درصد RAP بصورت مستقیم از درشت دانه گرفته شده و درصد سرباره از مقدار باقیمانده گرفته می شود) در طرح اختلاط استفاده شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۴-۵ نشان داده شده است. بنابر نتایج افزایش درصد سرباره می تواند نتایج بهتری را حاصل کند. سرباره همانطور که در فصل قبل گفته شد، خواص شیمیایی نزدیکی به سیمان پرتلند دارد و در ترکیب با سیمان بصورت فعال عمل می کند. سطح زاویه دار و درشت آن نیز در طرح اختلاط چفت و بست بهتری را ایجاد کرده است.

جدول ۴-۵ : مقاومت فشاری و مدول سرباره

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰	۳۱/۶	۵۰/۷۸	۳۳/۹۹
۲۵	۳۳/۷۷	۵۴/۲۳	۳۵/۱۴
۳۵	۳۷/۲۸	۵۹/۹	۳۶/۹۲
۱۰۰	۴۰/۲۹	۷۹/۲	۴۲/۴۵

روند صعودی سرباره در شکل ۵-۶ نشان داده است. مطابق نمودار استفاده از سرباره جایگزین درشت دانه روند افزایشی بر مقاومت فشاری داشته است و با افزایش آن مقاومت فشاری افزایش می یابد.



شکل ۵-۶ : نمودار سرباره - مقاومت فشاری

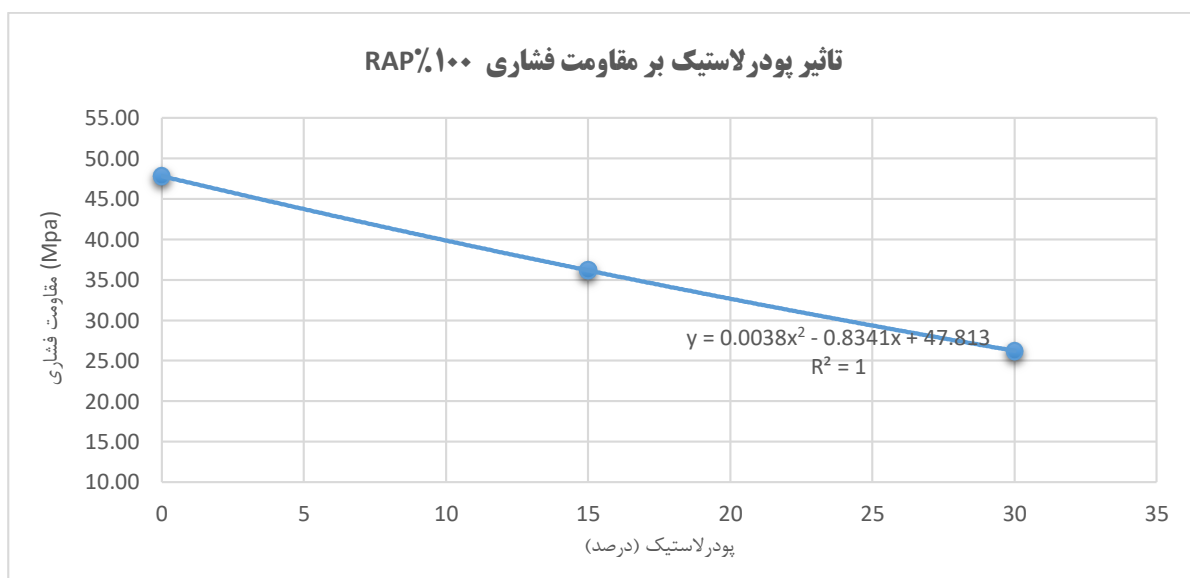
۵-۲-۴ تأثیر ترکیب پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

در این بخش اثرگذاری ترکیبی پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی بررسی شد. درصد های انتخاب شده مطابق جدول ۵-۵ صورت گرفته است. در تمامی نمونه ها، درصد RAP ثابت و مقدار ۱۰۰ درصد به عنوان جایگزین درشت دانه انتخاب شد و درصد پودر لاستیک متغیر بوده و جایگزین ریزدانه شده است. باتوجه به نتایج بخش قبلی RAP ۱۰۰٪ مقاومت بتن غلتکی را کاهش داد حال حضور لاستیک به عنوان ماده ای دیگر و واکنش ضعیف پودر لاستیک و RAP عملکرد را بیشتر از قبل پایین خواهد آورد.

جدول ۵-۵ : تأثیر پودر لاستیک بر مقاومت فشاری و مدول نمونه RAP ۱۰۰٪

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۱۰۰٪ پودر لاستیک - RAP ۱۰۰٪	۲۹/۷۵	۴۷/۸۱	۳۲/۹۸
۱۵٪ پودر لاستیک - RAP ۱۰۰٪	۲۲/۵	۳۶/۱۶	۲۸/۶۸
۳۰٪ پودر لاستیک - RAP ۱۰۰٪	۱۶/۳۲	۲۶/۲۳	۲۴/۴۳

نمودار ۵-۷ روند کلی اثرگذاری این دو ماده را در طرح اختلاط مربوطه بر بتن غلتکی نشان می دهد. طبق نمودار با افزایش پودر لاستیک در نمونه ۱۰۰ درصد RAP، مقاومت فشاری کاهش می یابد. با این حال بیشترین درصدی که می توان با این دو ماده جایگزین، نتیجه گرفت، نمونه RAP ۱۰۰٪ - ۳۰٪ پودر لاستیک می باشد و بعنوان نمونه بهینه برای طرح اختلاط پودر لاستیک - آسفالت بازیافتی در بتن غلتکی معرفی می شود.



شکل ۵-۷ : نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی

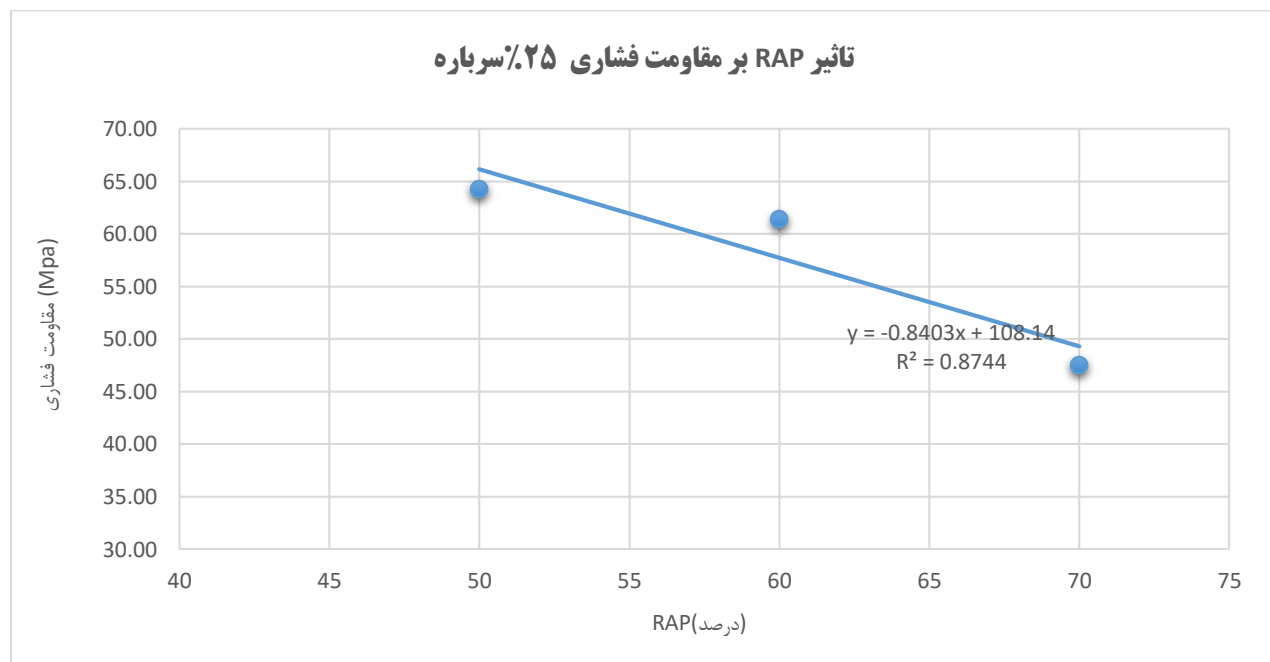
۵-۲-۵ تاثیر ترکیب سرباره و آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و آسفالت بازیافتی اختصاص یافته است. مطابق جدول ۵-۵ درصد سرباره در تمامی نمونه ها ثابت و درصد RAP متغیر بوده است. هر دو ماده، جایگزین درشت دانه می شوند با این تفاوت که RAP بعنوان جایگزین اول، درصد مورد نیاز خود را از طرح اختلاط می گیرد و سرباره درصد خود را از مابقی درشت دانه اختیار می کند. با مقایسه نتایج جداول ۴-۵ و ۶-۵ با حضور سرباره کنار RAP باید کمی عملکرد نمونه ها بهبود یابد.

جدول ۶-۵ : تاثیر RAP بر مقاومت فشاری و مدول نمونه ۲۵٪ سرباره

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۲۵٪ سرباره-RAP ۵۰٪	۴۰	۶۴/۲۹	۳۸/۲۴
۲۵٪ سرباره-RAP ۶۰٪	۳۸/۵	۶۱/۴	۳۷/۳۸
۲۵٪ سرباره-RAP ۷۰٪	۲۹/۷	۴۷/۴۸	۳۲/۸۹

نمودار ۵-۸ روند کلی این اثرگذاری را ترسیم کرده است. مطابق نمودار با افزایش درصد RAP از مقاومت فشاری نمونه کاسته شده است. با این حال تمامی نمونه ها این ترکیب مورد قبول RCC می باشد.



شکل ۵-۸ : نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی سرباره و آسفالت بازیافتی

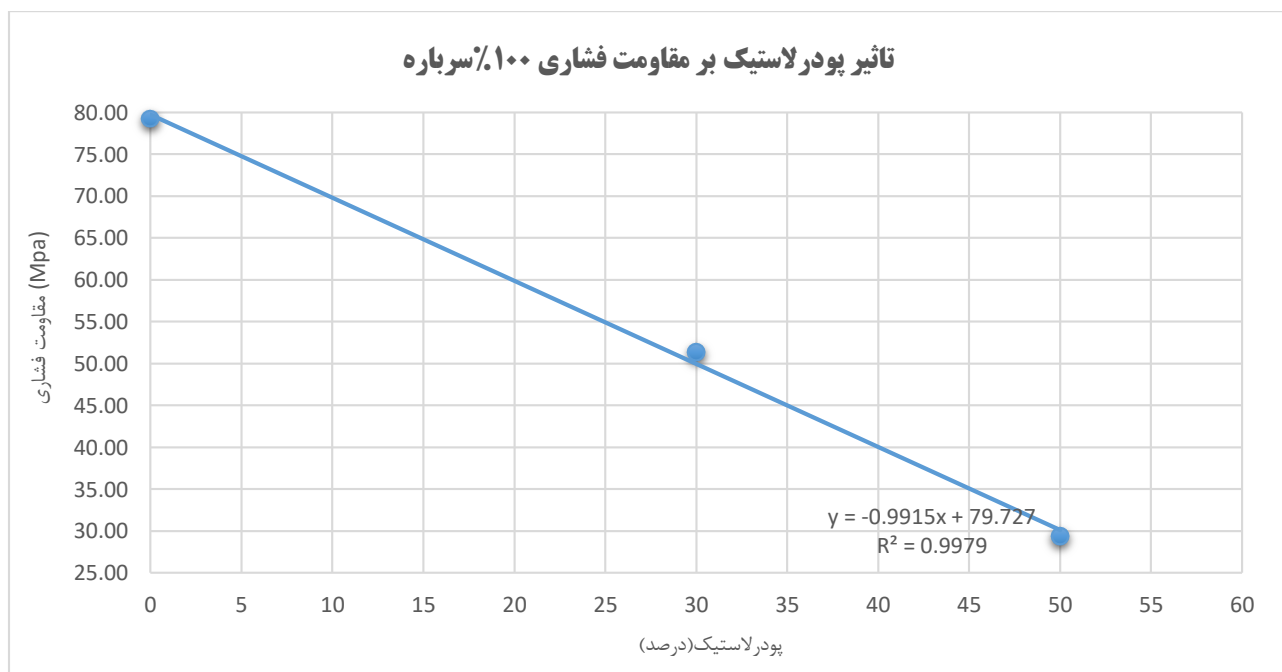
۵-۲-۶ تاثیر ترکیب سرباره و پودرلاستیک بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

این بخش به اثر ترکیبی سرباره و پودرلاستیک اشاره کرده است. جدول ۵-۷ درصد‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. پودرلاستیک جایگزین ریزدانه و سرباره جایگزین درشت دانه شده است. مطابق جدول فوق درصد سرباره ثابت و درصد پودرلاستیک متغیر بوده می‌باشد. در نتایج قبلی به ضعف پودرلاستیک و تاثیر مثبت سرباره رسیدیم، در کنارهم نیز این تاثیر نمایان است. درصد استفاده از پودرلاستیک در حضور سرباره به مقدار ۵۰٪ افزایش یافته و ترکیب بهینه ۱۰۰٪ سرباره-۵۰٪ پودرلاستیک به عنوان درصد بهینه معرفی شده است.

جدول ۵-۷ : تاثیر پودرلاستیک بر مقاومت فشاری و مدول نمونه ۱۰۰٪ سرباره

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰٪ پودرلاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۴۹/۲۹	۷۹/۲	۴۲/۴۵
۳۰٪ پودرلاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۳۱/۹۲	۵۱/۳	۳۴/۱۶
۵۰٪ پودرلاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۱۸/۲۷	۲۹/۳۶	۲۵/۸۵

نمودار ۵-۹ روند کلی این اثرگذاری را بازگو می‌کند. همانطور که مشخص شده است با افزایش پودرلاستیک، مقاومت فشاری نیز کاهش یافته است.



شکل ۵-۹ : نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی سرباره و پودرلاستیک

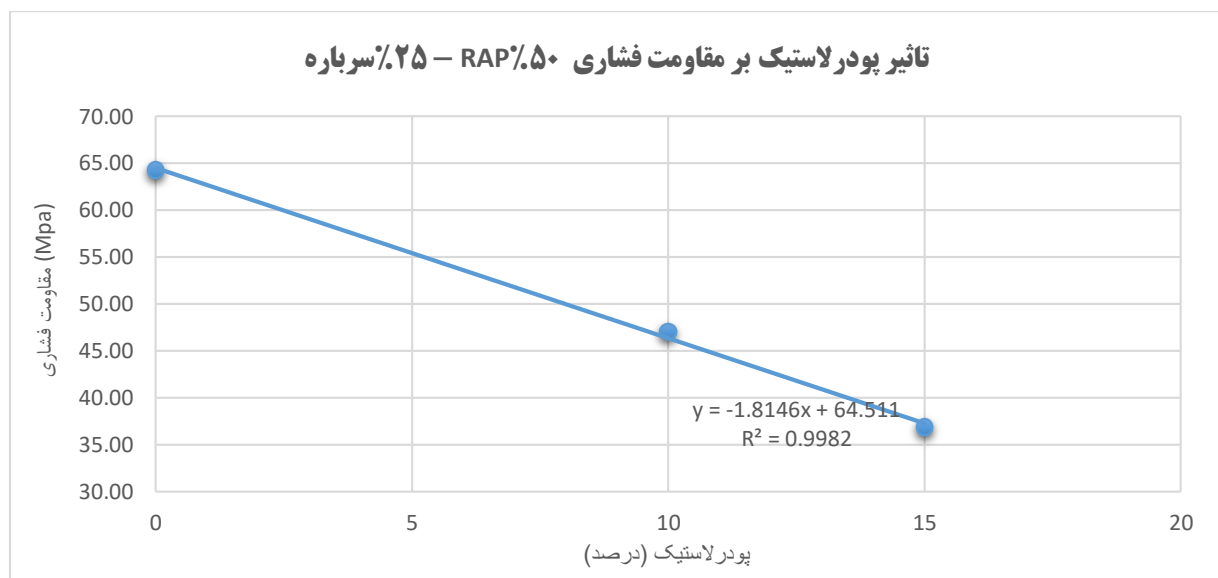
۵-۲-۷ تأثیر ترکیب سه کانه سرباره و پودر لاستیک و RAP بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته :

در قسمت ابتدایی این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و RAP و پودر لاستیک پرداخته است. درصد های انتخابی مطابق جدول ۵-۸ انتخاب شده است. درصد سرباره و RAP در تمامی نمونه ها ثابت و تنها پودر لاستیک در نمونه ها متغیر بوده است. سرباره و RAP جایگزین درشت دانه و پودر لاستیک جایگزین ریزدانه شده است. در واقع نتایج این جدول تاییدی بر اثر گذاری کاهشی پودر لاستیک در کنار الباقی مصالح جایگزین است.

جدول ۵-۸ : تأثیر پودر لاستیک بر مقاومت فشاری و مدول نمونه ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪	۴۰	۶۴/۲۹	۳۸/۲۵
۱۰٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪	۲۹/۲۶	۴۷/۰۳	۳۲/۷۱
۱۵٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪	۲۲/۹۳	۳۶/۸۵	۲۸/۹۵

مطابق نمودار ۵-۱۰، با افزایش پودر لاستیک، در حضور ثابت RAP و سرباره، مقاومت فشاری کاهش یافته است.



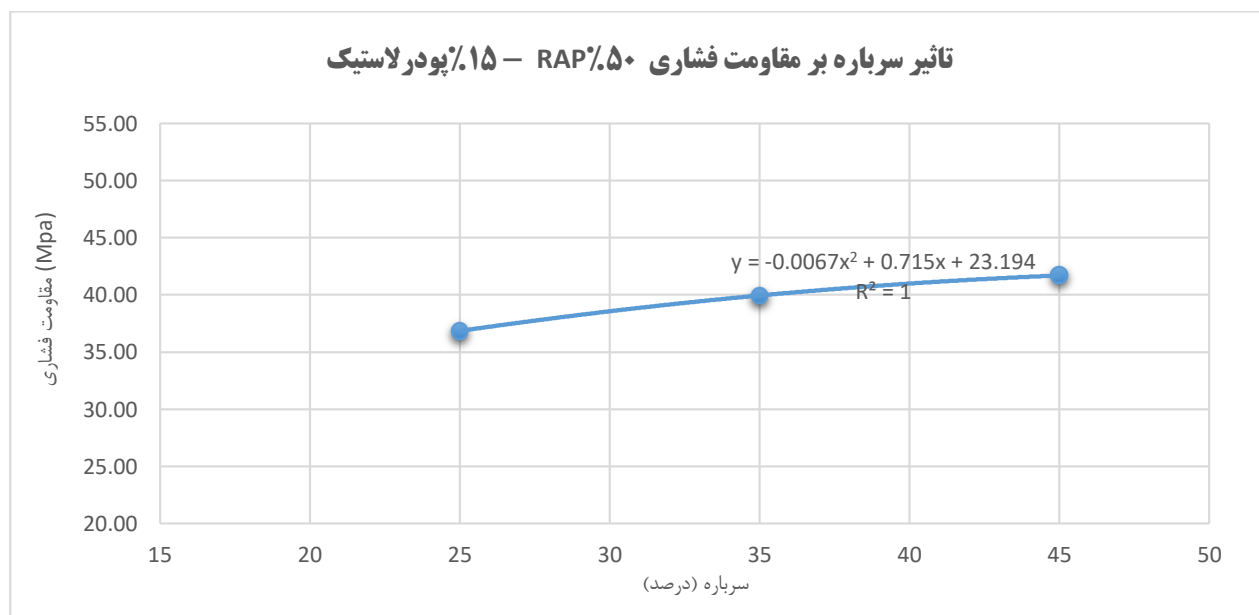
شکل ۵-۱۰ : نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی پودر لاستیک و سرباره و آسفالت بازیافتی

در قسمت میانی این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و RAP و پودر لاستیک پرداخته است. درصد های انتخابی مطابق جدول ۵-۹ انتخاب شده است. درصد پودر لاستیک و RAP در تمامی نمونه ها ثابت و تنها سرباره در نمونه ها متغیر بوده است. سرباره و RAP جایگزین درشت دانه و پودر لاستیک جایگزین ریزدانه شده است.

جدول ۵-۹: تاثیر سرباره بر مقاومت فشاری و مدول نمونه ۱۵٪پودرلاستیک -RAP ۵۰٪

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۲۵٪سرباره-۱۵٪پودرلاستیک-RAP ۵۰٪	۲۲/۹۳	۳۶/۸۵	۲۸/۹۶
۳۵٪سرباره-۱۵٪پودرلاستیک-RAP ۵۰٪	۲۴/۸۶	۳۹/۹۵	۳۰/۱۵
۴۵٪سرباره-۱۵٪پودرلاستیک-RAP ۵۰٪	۲۵/۹	۴۱/۷۰	۳۰/۸۰

مطابق شکل ۵-۱۱، با افزایش سرباره، در حضور ثابت RAP و پودرلاستیک، مقاومت فشاری افزایش یافته است. همه نمونه ها مورد تایید بتن غلتکی می باشند چرا که حداقل مقاومت را دریافت کرده اند. نمونه ۴۵٪ سرباره -۱۵٪پودرلاستیک و ۵۰٪ RAP بیشترین مقاومت موردنظر را حاصل می کند.



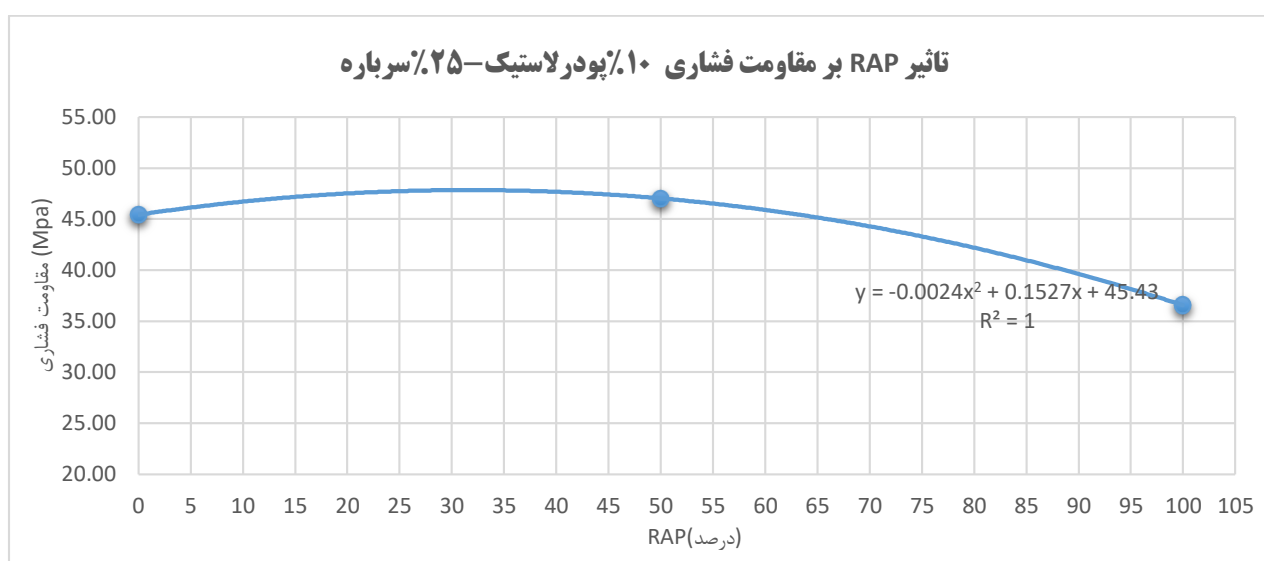
شکل ۵-۱۱: نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی پودرلاستیک و سرباره و آسفالت بازیافتی

در قسمت انتهایی این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و RAP و پودرلاستیک پرداخته است. درصد های انتخابی مطابق جدول ۵-۱۰ انتخاب شده است.درصد پودرلاستیک و سرباره در تمامی نمونه ها ثابت و تنها RAP در نمونه ها متغیر بوده است. سرباره و RAP جایگزین درشت دانه و پودر لاستیک جایگزین ریزدانه شده است.

جدول ۵-۱۰ : تاثیر RAP بر مقاومت فشاری و مدول نمونه ۱۰٪پودرلاستیک - ۲۵٪سرباره

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰٪-RAP ۱۰٪پودرلاستیک-۲۵٪سرباره	۲۸/۲۷	۴۵/۴۳	۳۲/۱۵
۵٪-RAP ۱۰٪پودرلاستیک-۲۵٪سرباره	۲۹/۲۶	۴۷/۰۳	۳۲/۷۱
۱۰٪-RAP ۱۰٪پودرلاستیک-۲۵٪سرباره	۲۲/۷۵	۳۶/۵۶	۲۸/۸۴

مطابق نمودار ۵-۱۲، با افزایش RAP، در حضور ثابت سرباره و پودرلاستیک، مقاومت فشاری کاهش یافته است. همه نمونه ها مورد تایید بتن غلطکی می باشند چرا که حداقل مقاومت را دریافت کرده اند .



شکل ۵-۱۲: نمودار مقاومت فشاری نمونه ترکیبی پودرلاستیک و سرباره و آسفالت بازیافتی

۵-۳ آزمایش مقاومت خمشی :

در این تحقیق جهت تعیین مدول گسیختگی از آیین نامه ASTM C78 استفاده شده است. بارگذاری با نرخ ۰/۱ Mm/Min وارد می شود [۸۴]. طبق این استاندارد، مقاومت خمشی تیرهای بتنی بر روی دو تکیه گاه ساده، تحت بار ناشی از خمش چهار نقطه ای، مطابق شکل ۵-۱۳ و ۵-۱۴ تعیین شده و نتایج به صورت مدول گسیختگی بیان می شود. شکل ۵-۱۵ نحوه گسیختگی انواع نمونه ها را در دستگاه آزمایش نشان می دهد.



شکل ۵-۱۵: شکست تیر بتنی در دستگاه آزمایش

با توجه به شکل ۵-۱۳ نحوه انجام محاسبه مدول گسیختگی بصورت زیر می باشد:

۱- اگر سطح شکست در یک سوم میانی فاصله تکیه گاه قرار گیرد، مدول گسیختگی از طریق رابطه زیر محاسبه می شود :

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{رابطه ۵-۲:}$$

R : مدول گسیختگی (مگاپاسکال)

P : بار لحظه گسیختگی (نیوتن)

L : فاصله تکیه گاهی با طولی از نمونه که بر روی دو تکیه گاه واقع شده است. (میلیمتر)

b و d : به ترتیب عرض و ارتفاع نمونه (میلیمتر)

۲- اگر گسیختگی در خارج از یک سوم میانی نمونه و در فاصله ای کمتر از ۵ درصد فاصله تکیه گاهی نسبت به آن محدوده رخ دهد، در این صورت مدول گسیختگی با رابطه زیر بدست می آید.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{رابطه ۵-۳:}$$

a : میانگین فاصله ترک ایجاد شده در سطح کششی نمونه تا نزدیکترین تکیه گاه (میلیمتر)

۳- اگر گسیختگی در خارج از یک سوم میانی نمونه و در فاصل های بیشتر از ۵ درصد فاصله تکیه گاه نسبت به آن محدوده رخ دهد نمونه مورد نظر فاقد اعتبار می باشد.

لازم به ذکر است استانداردهای ASTM C1018 و ASTM C78 مقادیر d و b را برابر یک سوم فاصله تکیه گاهی در نظر می گیرند.

۴-۵ نتایج آزمایش های مقاومت خمشی :

طریقه دسته بندی نمونه ها ابتدا براساس حداکثر درصدی است که پژوهش های قبلی انجام دادند و در صورتی که نتیجه مورد قبول باشد یک گام فراتر رفته و حداکثر درصدی که بتوان از ماده جایگزین استفاده کرد، یافته شده است.

۴-۵-۱ تاثیر پودر لاستیک بر روی مقاومت خمشی :

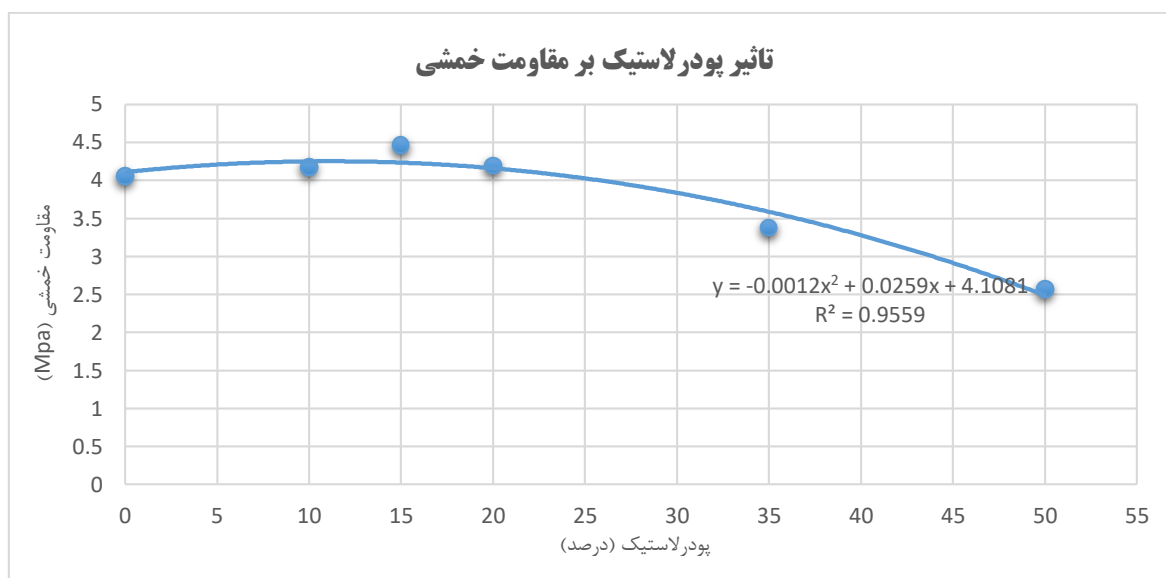
پژوهشهای قبلی به حداکثر درصدی که برای پودرلاستیک رسیده بودند، مقدار ۱۵ درصد جایگزین ریزدانه بوده است. پودرلاستیک با درصدهایی که در بالا ذکر شده جایگزین ریزدانه (الکهای شماره ۴، ۸، ۱۶، ۳۰، ۵۰) در طرح اختلاط شد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۷ روزه در جدول ۵-۱۱ نشان داده شده است. بنابر نتایج حداکثر درصدی که می توان از پودرلاستیک نتیجه گرفت ۲۰٪ می باشد و درصدهای بالاتر مقاومت خمشی کمتر از ۴ مگاپاسکال خواهند داشت. از آنجایی که در جدول ۵-۱ تا ۳۵٪ برای آزمایش مقاومت فشاری جواب گرفتیم، پس می توان ۲۰٪ که از جدول ۵-۱۰ نتیجه شده است را به عنوان درصد مورد قبول برای بتن غلتکی بیان کنیم.

جدول ۵-۱۱: مقاومت خمشی پودر لاستیک

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰	۴/۰۵
۱۰	۴/۱۸
۱۵	۴/۴۶
۲۰	۴/۱۹
۳۵	۳/۳۸
۵۰	۲/۵۷

روند اثرگذاری پودرلاستیک جایگزین ریزدانه در شکل ۵-۱۶ نشان داده است. لاستیک با توجه به اینکه از مصالح طبیعی انعطاف پذیرتر و چگالی آن کمتر است، در آزمایش خمشی نیز تاثیر خود را گذاشته و تا ۱۵٪ روند صعودی داشته و مقاومت خمشی افزایش یافته است. پس از آن روند نزولی پیدا کرده و در درصدهای بالاتر از شدت مقاومت کاسته شده است. طریقه گسیختگی نمونه دارای پودرلاستیک نیز متمایز از نمونه کنترلی بوده است.

همانطور که در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است، اولین شکل مربوط به شکست تیر بتنی دارای پودر لاستیک است که گسیختگی به شکل ترد و شکننده نبوده و بعد از شکست تیر به دو قطعه تبدیل نشده است.



شکل ۵-۱۶ نمودار مقاومت خمشی پودر لاستیک

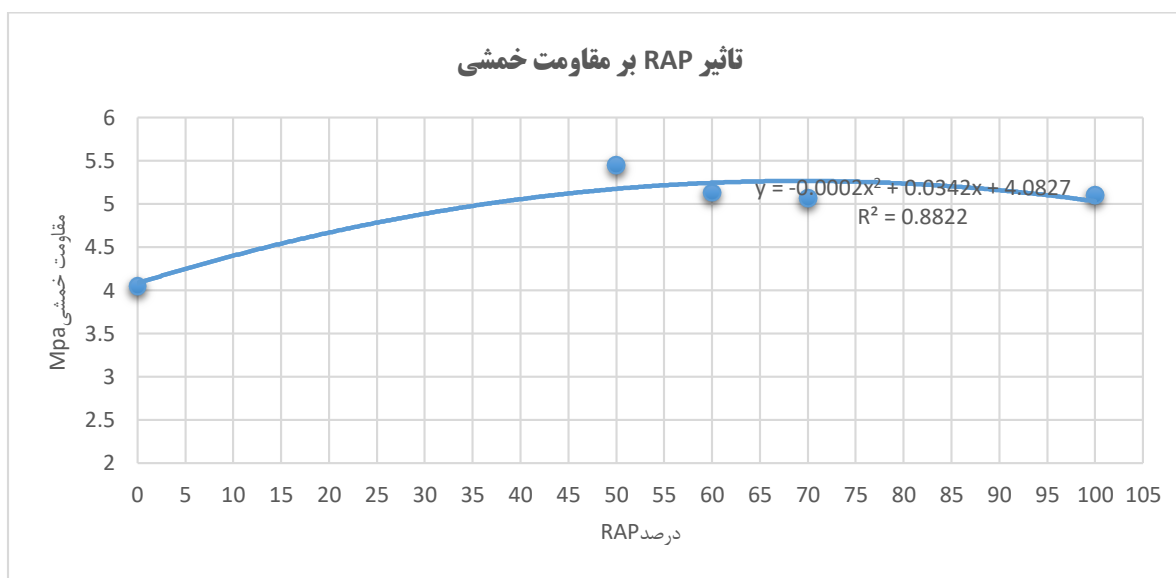
۵-۴-۲ تأثیر آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت خمشی:

پژوهش های قبلی به حداکثر درصدی که برای پودر لاستیک رسیده بودند، مقدار ۵۰ درصد جایگزین درشت دانه بوده است. آسفالت بازیافتی RAP با درصدهایی که در بالا ذکر شده جایگزین درشت دانه در طرح اختلاط شد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۷ روزه در جدول ۵-۱۲ نشان داده شده است. بنابر نتایج، ۱۰۰ درصد RAP می تواند جایگزین ریزدانه شود چرا که مقاومتی فراتر از مقاومت نمونه کنترلی نشان داده است. استفاده از RAP تا ۵۰٪ موجب بهبود مقاومت خمشی شده است، قیر نسبت به مصالح طبیعی سنگی انعطاف پذیرتر بوده و تا درصدی میتواند عملکرد بتن را بهبود ببخشد. از درصد ۵۰ به بالا مقاومت روند نزولی داشته ولی تا ۱۰۰ درصد حداقل مقاومت مورد نیاز بتن غلتکی را ارضا کرده است.

جدول ۵-۱۲: مقاومت خمشی آسفالت بازیافتی

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰	۴/۰۵
۵۰	۵/۴۵
۶۰	۵/۱۳
۷۰	۵/۰۷
۱۰۰	۵/۱

روند صعودی-نزولی آسفالت بازیافتی در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. حال با استفاده از جدولهای ۵-۳ و ۵-۱۲ درصد نهایی برای ساخت بتن غلتکی دارای آسفالت، درصد ۱۰۰ اعلام می شود.



شکل ۵-۱۷: نمودار مقاومت خمشی آسفالت بازیافتی

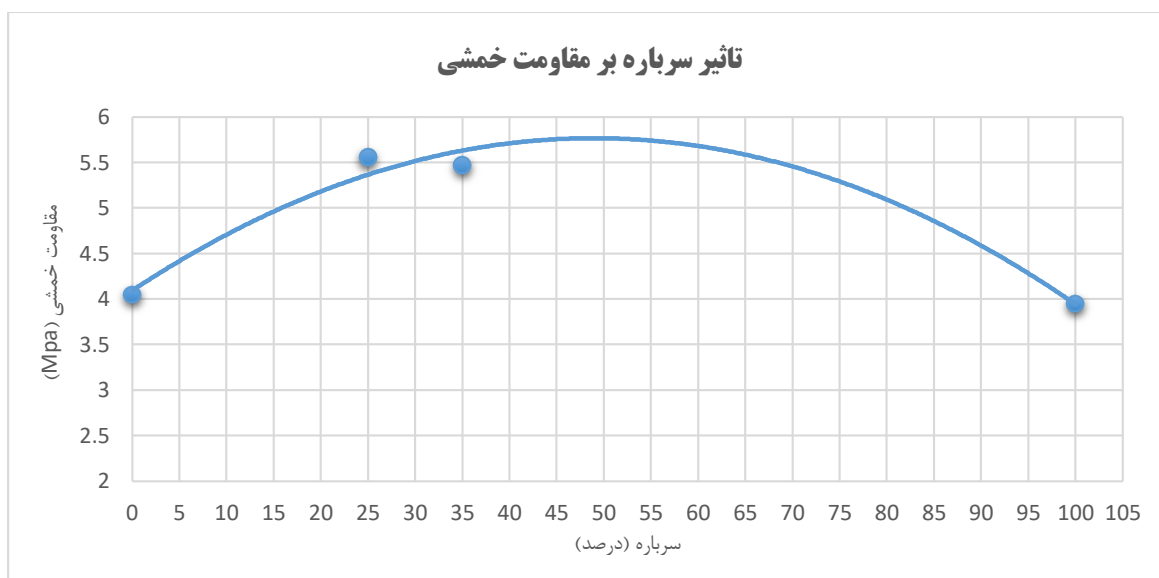
۵-۴-۳ تأثیر سرباره (Slag) بر روی مقاومت خمشی :

در پژوهشهای قبلی سرباره جایگزین مصالح طبیعی نقش مثبت داشته و با افزایش مقدار آن در طرح اختلاط موجب افزایش مقاومت خمشی شده است. سرباره با درصدهایی که در بالا ذکر شده به عنوان جایگزین دوم درشت دانه در طرح اختلاط استفاده شد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۷ روزه در جدول ۵-۱۳ نشان داده شده است. بنابر نتایج ۳۵٪ سرباره مقاومت خمشی کمتری از ۲۵٪ سرباره داشته است چرا که سرباره بسیار ترد و صلب بوده و انعطاف پذیری ناچیزی از خود نشان می دهد، این ویژگی صلبیت آن تا حدودی موجب افزایش مقاومت خمشی

شده است ولی از یک جایی به بعد شکستی ترد اتفاق خواهد افتاد که تصاویر آزمایش ها (شکل ۵-۱۵) کاملاً گویا این نوع شکست هستند. روند صعودی سرباره تا ۲۵٪ و سپس روند نزولی آن تا ۱۰۰٪ در شکل ۵-۱۸ نشان داده است. با این حال درصدهای بالاتر سرباره نیز مقاومت خمشی بالاتری از مقاومت نمونه کنترلی دارند و می توان ۱۰۰٪ سرباره را نیز جایگزین مصالح طبیعی کرد.

جدول ۵-۱۳: مقاومت خمشی سرباره

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰	۴/۰۵
۲۵	۵/۵۶
۳۵	۵/۴۷
۱۰۰	۳/۹۵



شکل ۵-۱۸: نمودار مقاومت خمشی سرباره

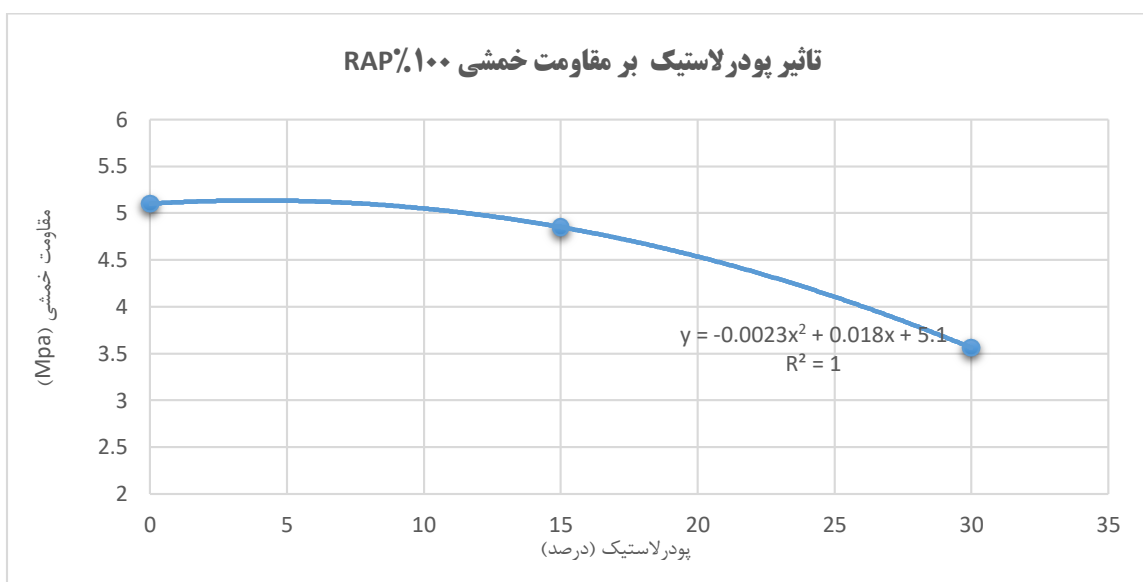
۵-۴-۴ تأثیر ترکیب پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت خمشی:

در این بخش اثرگذاری ترکیبی پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی بررسی شد. درصدهای انتخاب شده مطابق جدول ۵-۱۴ صورت گرفته است. در تمامی نمونه ها، درصد RAP ثابت و مقدار ۱۰۰ درصد به عنوان جایگزین درشت دانه انتخاب شد و درصد پودرلاستیک متغیر بوده و جایگزین ریزدانه شده است. شکل ۵-۱۹ روند کلی اثرگذاری این دو ماده را در طرح اختلاط مربوطه بر بتن غلتکی نشان می دهد. طبق نمودار با افزایش پودرلاستیک در نمونه ۱۰۰ درصد RAP، مقاومت خمشی کاهش می یابد. در نتایج مقاومت فشاری ترکیب پودر لاستیک و RAP نمونه

RAP ۱۰۰٪-۳۰٪ پودر لاستیک حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز را تامین کرد و بعنوان نمونه بهینه برای طرح اختلاط پودر لاستیک-آسفالت بازیافتی در بتن غلتکی معرفی شد اکنون نیز این ترکیب توانسته است حداقل مقاومت خمشی را ارضا کند و به عنوان نمونه بهینه ترکیب این دو ماده جایگزین معرفی می گردد.

جدول ۵-۱۴: تاثیر پودر لاستیک بر مقاومت خمشی نمونه RAP ۱۰۰٪

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۱۰٪ پودر لاستیک-RAP ۱۰۰٪	۵/۱
۱۵٪ پودر لاستیک-RAP ۱۰۰٪	۴/۸۵
۳۰٪ پودر لاستیک-RAP ۱۰۰٪	۳/۵۶



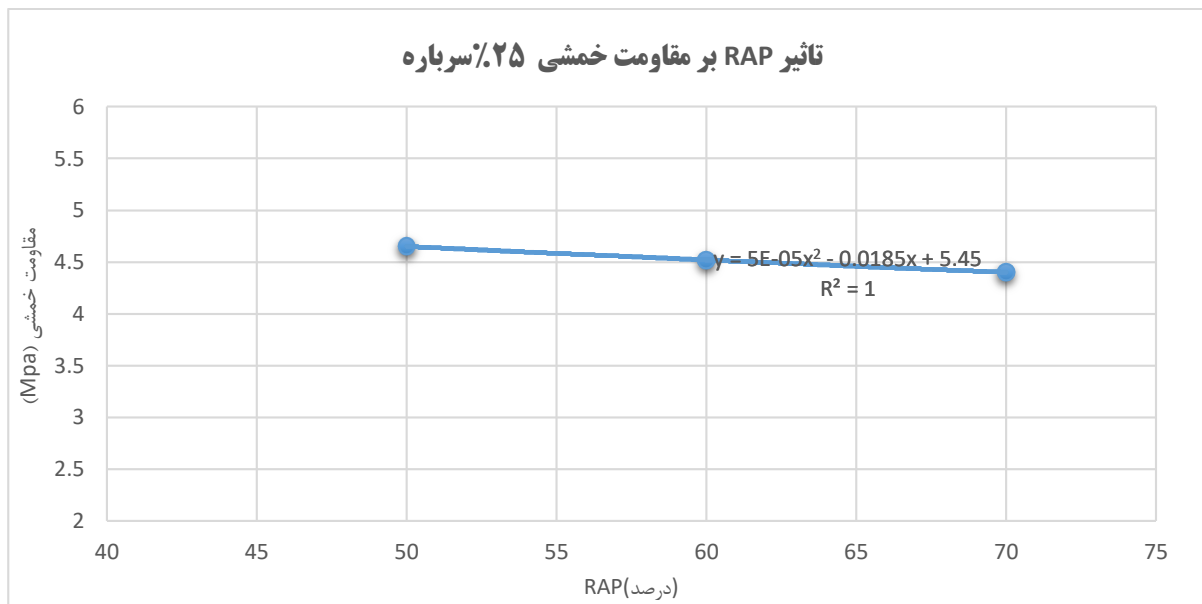
شکل ۵-۱۹: نمودار مقاومت خمشی نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

۵-۴-۵ تاثیر ترکیب سرباره و آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت خمشی:

این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و آسفالت بازیافتی اختصاص یافته است. مطابق جدول ۵-۱۵ درصد سرباره در تمامی نمونه ها ثابت و درصد RAP متغیر بوده است. هر دو ماده، جایگزین درشت دانه می شوند با این تفاوت که RAP بعنوان جایگزین اول، درصد مورد نیاز خود را از طرح اختلاط می گیرد و سرباره درصد خود را از مابقی درشت دانه اختیار می کند. طبق نتایج جدول ۵-۱۳، حضور سرباره از ۲۵٪ به بالا کمی عملکرد نمونه ها را کاهش می دهد. شکل ۵-۲۰ روند کلی این اثرگذاری را ترسیم کرده است. مطابق نمودار با افزایش درصد RAP از مقاومت خمشی نمونه کاسته شده است. نمونه RAP ۷۰٪ - ۲۵٪ سرباره به عنوان نمونه بهینه نهایی برای این ترکیب اعلام می شود.

جدول ۵-۱۵: تاثیر RAP بر مقاومت خمشی نمونه ۲۵٪ سرباره

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۲۵٪ سرباره-RAP ۵۰٪	۴/۶۵
۲۵٪ سرباره-RAP ۶۰٪	۴/۵۲
۲۵٪ سرباره-RAP ۷۰٪	۴/۴



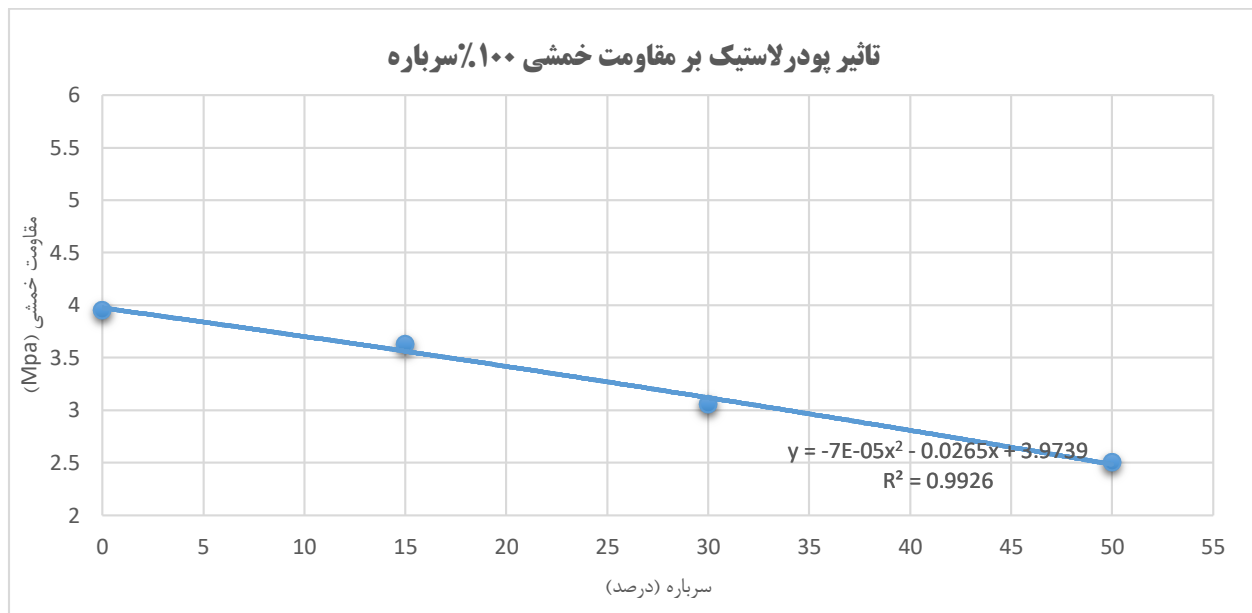
شکل ۵-۲۰: نمودار مقاومت خمشی نمونه ترکیبی سرباره آسفالت بازیافتی

۵-۴-۶ تاثیر ترکیب سرباره و پودر لاستیک بر روی مقاومت خمشی :

این بخش به اثر ترکیبی سرباره و پودر لاستیک اشاره کرده است. جدول ۵-۱۶ درصد‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. پودر لاستیک جایگزین ریزدانه و سرباره جایگزین درشت دانه شده است. مطابق جدول فوق درصد پودر لاستیک متغیر و درصد سرباره ثابت می‌باشد. در نتایج قبلی به تاثیر مثبت پودر لاستیک تا ۱۵٪ و تاثیر مثبت سرباره تا ۲۵٪ رسیدیم اکنون در کنارهم نیز این مقایسه انجام شده است. نمودار ۵-۲۱ روند کلی این اثرگذاری را بازگو می‌کند. همانطور که مشخص شده است با افزایش پودر لاستیک، در حضور ۱۰۰٪ سرباره مقاومت خمشی نیز کاهش یافته است و مطابق بخش ۵-۲-۶ و جدول ۵-۷ که ۱۰۰٪ سرباره و ۵۰٪ پودر لاستیک توانسته بود مقاومت فشاری مناسبی داشته باشد ولی مقاومت خمشی کمی دارد و نمونه بهینه این ترکیب ۱۰۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر لاستیک خواهد بود.

جدول ۵-۱۶: تاثیر پودر لاستیک بر مقاومت خمشی نمونه ۱۰۰٪ سرباره

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۳/۹۵
۱۵٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۳/۶۳
۳۰٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۳/۰۶
۵۰٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره	۲/۵



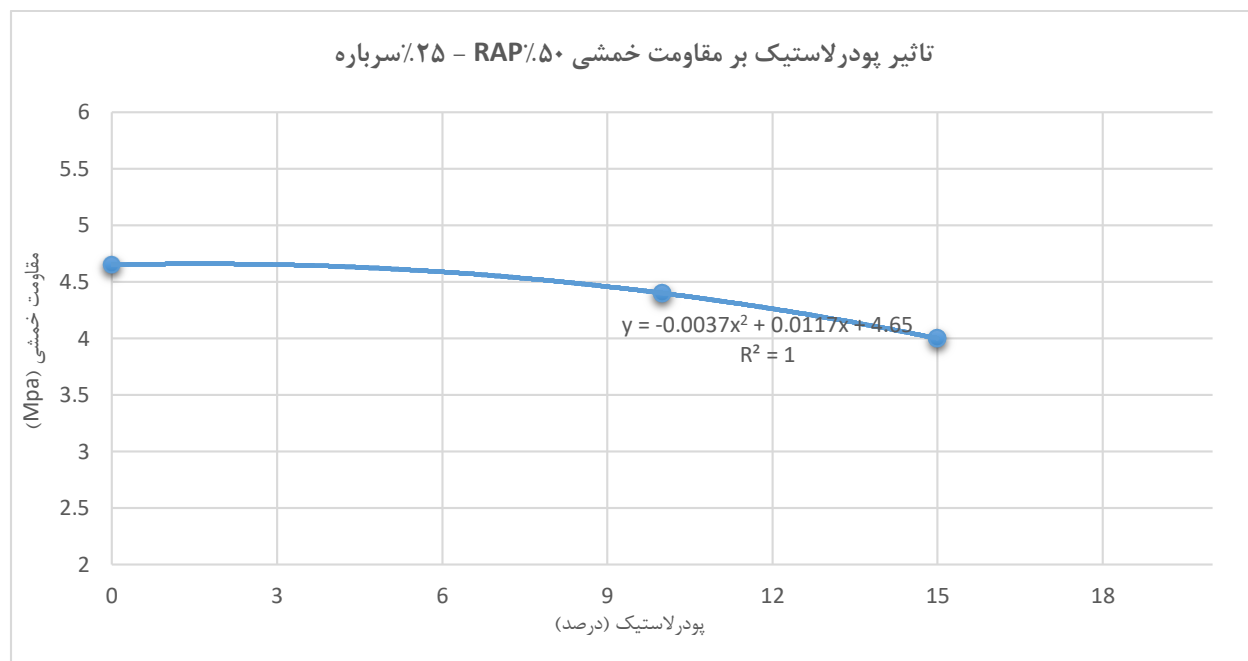
شکل ۵-۲۱: نمودار مقاومت خمشی نمونه ترکیبی سرباره پودر لاستیک

۵-۴-۷ تاثیر ترکیب سه گانه سرباره و پودر لاستیک و RAP بر روی مقاومت خمشی :

در قسمت ابتدایی این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و RAP و پودر لاستیک پرداخته است. درصد های انتخابی مطابق جدول ۵-۱۷ انتخاب شده است. درصد سرباره و RAP در تمامی نمونه ها ثابت و تنها پودر لاستیک در نمونه ها متغیر بوده است. سرباره و RAP جایگزین درشت دانه و پودر لاستیک جایگزین ریزدانه شده است. مطابق شکل ۵-۲۲، با افزایش پودر لاستیک، در حضور ثابت RAP و سرباره، مقاومت خمشی کاهش یافته است اگرچه که پودر لاستیک تا ۱۵٪ روند صعودی داشته ولی در ترکیب سه گانه نتوانسته همان عملکرد را از خود نشان دهد و موجب کاهش مقاومت شده است، منتهی این کاهش از مقاومت نمونه شاهد بیشتر بوده است. به همین منظور ۵۰٪ RAP - ۲۵٪ سرباره و ۱۵٪ پودر لاستیک به عنوان اولین طرح اختلاط بهینه معرفی شده است.

جدول ۵-۱۷: تاثیر پودر لاستیک بر مقاومت خمشی نمونه ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰ %

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪	۴/۶۵
۱۰٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪	۴/۴
۱۵٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره - RAP ۵۰٪	۴

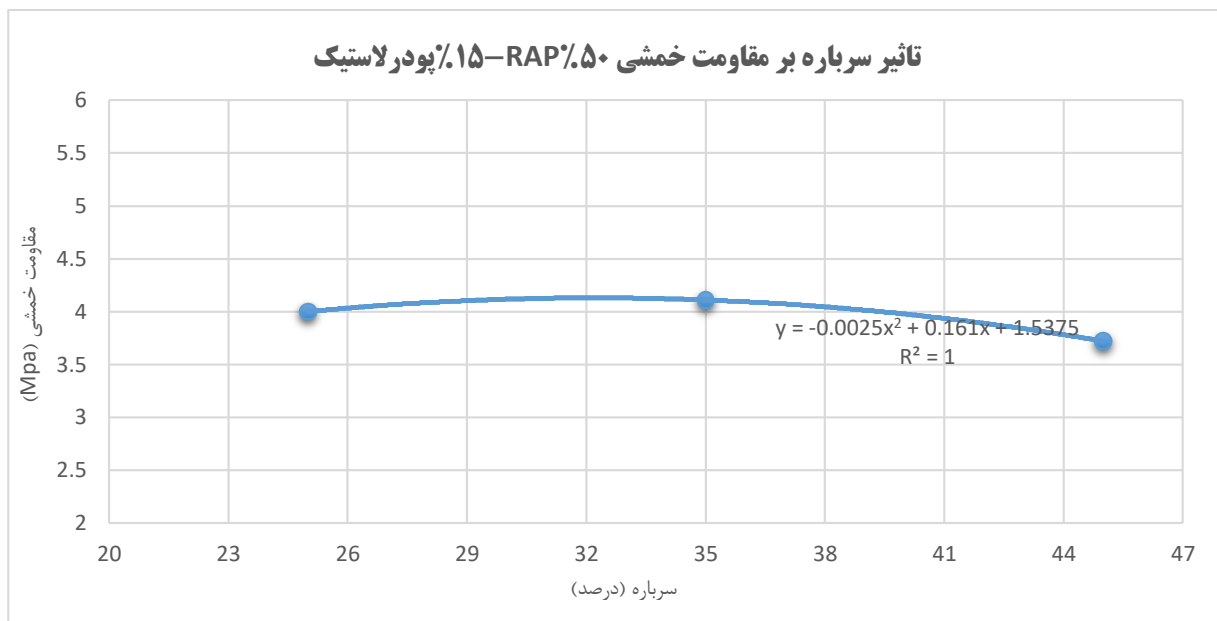


شکل ۵-۲۲: نمودار مقاومت خمشی ترکیب سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

در قسمت میانی این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و RAP و پودر لاستیک پرداخته است. درصد های انتخابی مطابق جدول ۵-۱۸ انتخاب شده است. درصد پودر لاستیک و RAP در تمامی نمونه ها ثابت و تنها سرباره در نمونه ها متغیر بوده است. سرباره و RAP جایگزین درشت دانه و پودر لاستیک جایگزین ریزدانه شده است. مطابق شکل ۵-۲۳، با افزایش سرباره، در حضور ثابت RAP و پودر لاستیک، مقاومت خمشی از ۳۵٪ به بالا کاهش یافته است. نمونه ۴۵٪ سرباره - ۱۵٪ پودر لاستیک و ۵۰٪ RAP مقاومت مورد نظر را حاصل و بعنوان دومین طرح اختلاط بهینه معرفی می گردد.

جدول ۵-۱۸: تاثیر سرباره بر مقاومت خمشی نمونه ۱۵٪ پودر لاستیک - RAP ۵۰ %

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۲۵٪ سرباره - ۱۵٪ پودر لاستیک - RAP ۵۰٪	۴
۳۵٪ سرباره - ۱۵٪ پودر لاستیک - RAP ۵۰٪	۴/۱۱
۴۵٪ سرباره - ۱۵٪ پودر لاستیک - RAP ۵۰٪	۳/۷۲

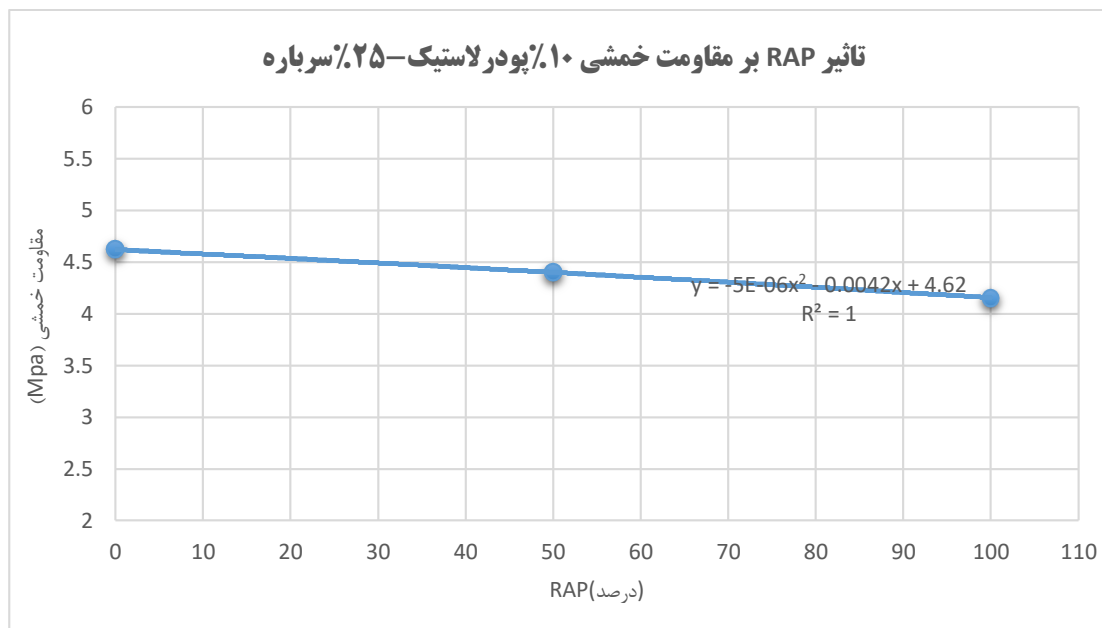


شکل ۵-۲۳: نمودار مقاومت خمشی ترکیب سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

در قسمت انتهایی این بخش به اثرگذاری ترکیبی سرباره و RAP و پودر لاستیک پرداخته است. درصد های انتخابی مطابق جدول ۵-۱۹ انتخاب شده است. درصد پودر لاستیک و سرباره در تمامی نمونه ها ثابت و تنها RAP در نمونه ها متغیر بوده است. سرباره و RAP جایگزین درشت دانه و پودر لاستیک جایگزین ریزدانه شده است. مطابق شکل ۵-۲۴، با افزایش RAP، در حضور ثابت سرباره و پودر لاستیک، مقاومت خمشی کاهش یافته است. درصد ۱۰٪ RAP - ۲۵٪ سرباره و ۱۰٪ پودر لاستیک به عنوان سومین طرح اختلاط بهینه معرفی میگردد.

جدول ۵-۱۹: تاثیر RAP بر مقاومت خمشی نمونه ۱۰٪ پودر لاستیک - ۲۵٪ سرباره

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰٪-RAP ۱۰٪ پودر لاستیک-۲۵٪ سرباره	۴/۶۲
۵۰٪-RAP ۱۰٪ پودر لاستیک-۲۵٪ سرباره	۴/۴
۱۰۰٪-RAP ۱۰٪ پودر لاستیک-۲۵٪ سرباره	۴/۱۵

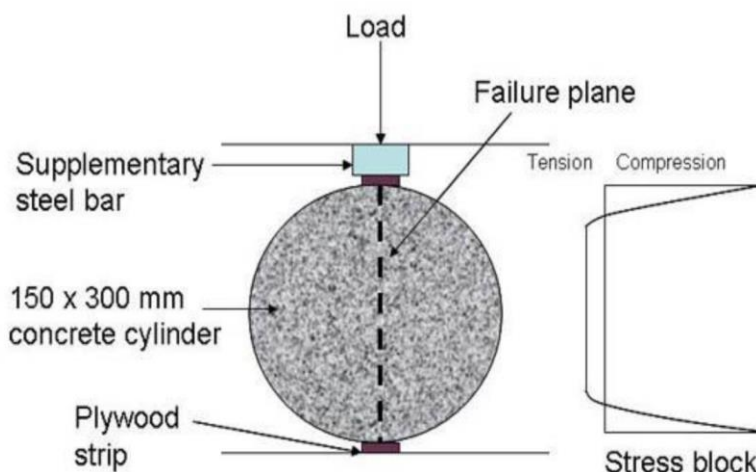


شکل ۵-۲۴: نمودار مقاومت خمشی ترکیب سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

۵-۵ آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن (غیر مستقیم)

مقاومت کششی یکی از خصوصیات مکانیکی بسیار مهم بتن است. روش های مستقیم و غیرمستقیم برای مشخص نمودن مقاومت کششی بتن وجود دارد. انجام آزمایش مقاومت کششی مستقیم بدلیل تمرکز تنش های محلی بسیار مشکل است که حذف این تمرکز تنش ها تنها با در نظر گرفتن تدابیر ویژه ای امکان پذیر می باشد. هدف از این آزمایش تعیین مقاومت کششی بتن به روش دو نیم نمودن آزمون های استوانه ای قالب گیری شده یا مغزه گیری شده می باشد، در این روش آزمون، با اعمال نیروی فشاری قطری روی آزمون استوانه ای بتن که بصورت افقی بین دو صفحه دستگاه آزمایش قرار گرفته، مقاومت کششی به روش دو نیم نمودن تعیین می گردد. از این آزمایش برای ارزیابی مقاومت برشی بتن در قطعات بتنی دانه سبک نیز استفاده می شود. طبق استاندارد ASTM C496 نمونه استوانه ای بتن را بصورت خوابیده در داخل گیره نگهدارنده قرار داده و با استفاده از یک وسیله مناسب در انتهای نمونه خطوط قطری رسم کرده بطوریکه خطوط در صفحه ای که از محور نمونه عبور می کند

قرار بگیرد. بار بطور یکنواخت و بدون تغییر ناگهانی با نرخ ثابتی حدود ۵۰۰ نیوتن بر ثانیه تا هنگام گسیختگی بر نمونه اعمال می شود. نمای شماتیک آزمایش در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده است. بیشترین بار وارد شده در زمان گسیختگی که توسط دستگاه آزمایش نشانه داده می شود ثبت می گردد [۸۳]. ابعاد استاندارد نمونه ها ۱۰×۲۰ سانتی متر بوده برای هر مخلوط آزمایش شدند [۸۳].



شکل ۵-۲۵: نمای شماتیک آزمایش شکست برزیلی

در این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C 496 از روش غیر مستقیم که به آزمایش دو نیم سازی استوانه ای یا آزمایش برزیلی نیز مشهور است استفاده می شود. در این آزمایش نمونه استوانه ای بتن در جهت طول (یال) استوانه تحت بار فشاری قرار گرفته و آزمایش تا گسیختگی طولی استوانه و تبدیل آن به دو نیم استوانه ادامه می یابد. در این صورت مقدار مقاومت کششی با استفاده از رابطه زیر به دست می آید.

$$T = \frac{2 P}{\pi L d} \quad \text{رابطه ۵-۴}$$

T: مقاومت کششی دو نیم شدن، کیلوپاسکال (مگاپاسکال)

P: حداکثر بار اعمال شده، (نیوتن)

L: طول نمونه، میلی متر

d: قطر نمونه، میلی متر



شکل ۵-۲۶: شکست نمونه استوانه ای در دستگاه آزمایش

۵-۶ نتایج آزمایش های مقاومت کششی غیرمستقیم:

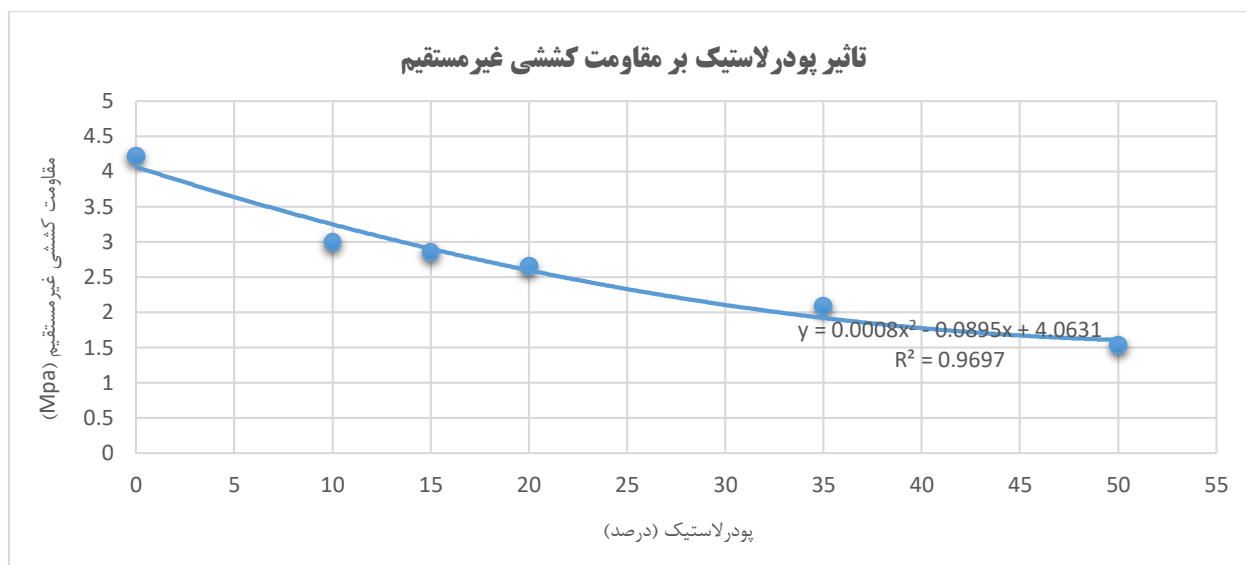
طریقه دسته بندی نمونه ها ابتدا براساس حداکثر درصدی است که پژوهش های قبلی انجام دادند و در صورتی که نتیجه مورد قبول باشد یک گام فراتر رفته و حداکثر درصدی که بتوان از ماده جایگزین استفاده کرد، یافته شده است.

۵-۶-۱ تاثیر پودر لاستیک بر روی مقاومت کششی غیرمستقیم:

همانطور که از جدول ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۷ مشخص است اثرگذاری پودر لاستیک بر مقاومت کششی بسیار بالاست چرا که پودر لاستیک نمی تواند چفت و بست مناسب و محکمی بین مصالح ایجاد کند و در آزمایش کششی حضور مناسبی در طرح اختلاط نداشته است، به همین جهت نمودار به وضوح تاثیر منفی پودر لاستیک بر مقاومت کششی را نشان داده است.

جدول ۵-۲۰: مقاومت کششی غیر مستقیم پودر لاستیک

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰	۴/۲۱
۱۰	۳
۱۵	۲/۸۵
۲۰	۲/۶۶
۳۵	۲/۰۹
۵۰	۱/۵۳



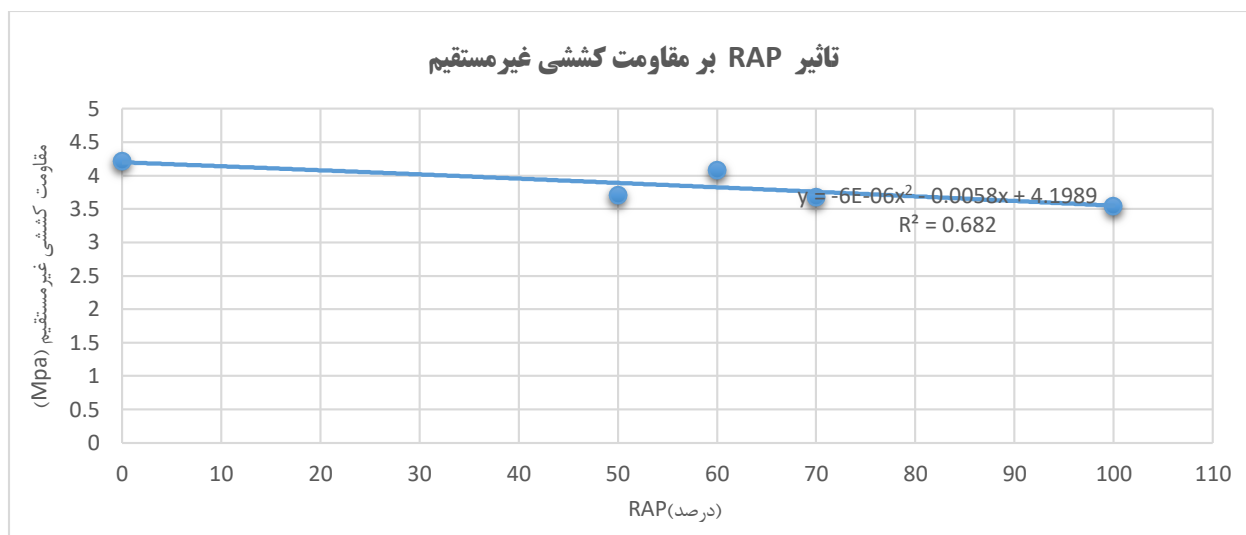
شکل ۵-۲۷: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم پودر لاستیک

۵-۶-۲ تأثیر آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت کششی غیر مستقیم:

جدول ۵-۲۱ تأثیر گذاری RAP را بر روی مقاومت کششی غیر مستقیم بیان می کند. همانطور که مشخص است، قیر موجود در ترکیب موجب افزایش مقاومت کششی نشده است ولی روند کاهشی بهتری نسبت به پودر لاستیک از خود نشان داده است. شکل ۵-۲۸ نیز صحت آنرا نشان داده شده است که در درصدهای بالا RAP مقاومت کششی غیر مستقیم کاهش یافته است.

جدول ۵-۲۱: مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت بازیافتی

مقاومت ۷ روزه (Mpa)	درصد RAP
۴/۲۱	۰
۳/۷۱	۵۰
۴/۰۸	۶۰
۳/۶۸	۷۰
۳/۵۴	۱۰۰



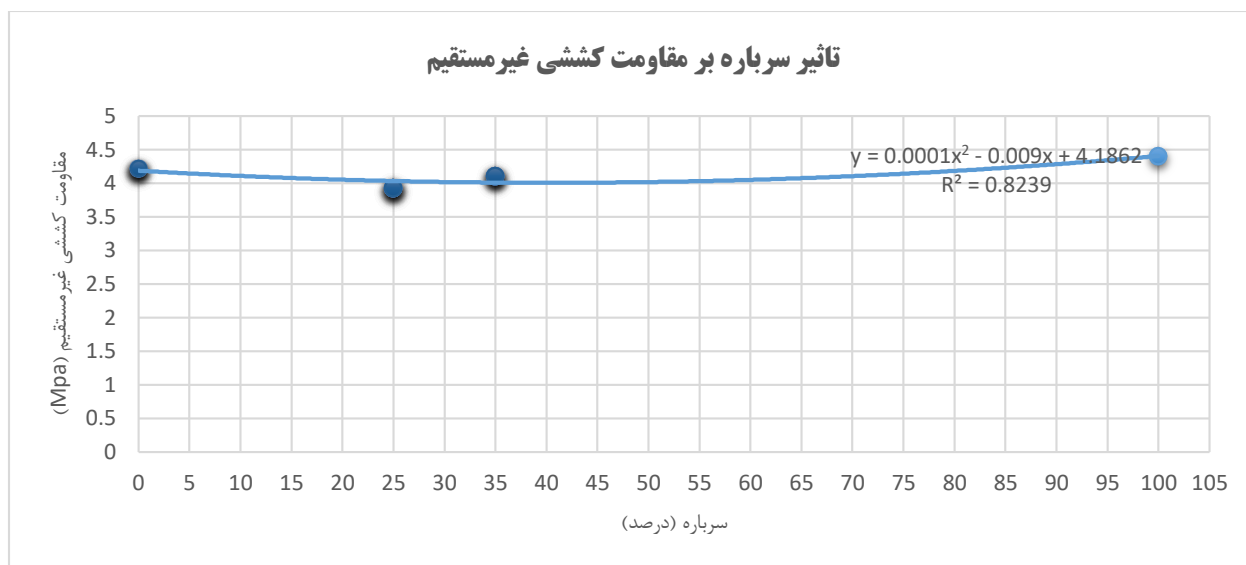
شکل ۵-۲۸: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت بازیافتی

۵-۶-۳ تأثیر سرباره (Slag) بر روی مقاومت کششی غیرمستقیم :

حضور سرباره در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم اثرگذارتر از الباقی مواد جایگزین بوده است. جدول ۵-۲۲ درصد‌های جایگزین سرباره و نتایج بدست آمده از مقاومت کششی غیرمستقیم را نشان می دهد. مطابق نمودار ۵-۲۹ سرباره تا ۲۵٪ کمی از مقدار مقاومت کششی نمونه شاهد کمتر شده است. ولی ولی در درصد‌های بالاتر گویا چفت و بست بهتری توانسته ایجاد کند و مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش یافته است.

جدول ۵-۲۲: مقاومت کششی غیر مستقیم سرباره

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰	۴/۲۱
۲۵	۳/۹۲
۳۵	۴/۱
۱۰۰	۴/۴



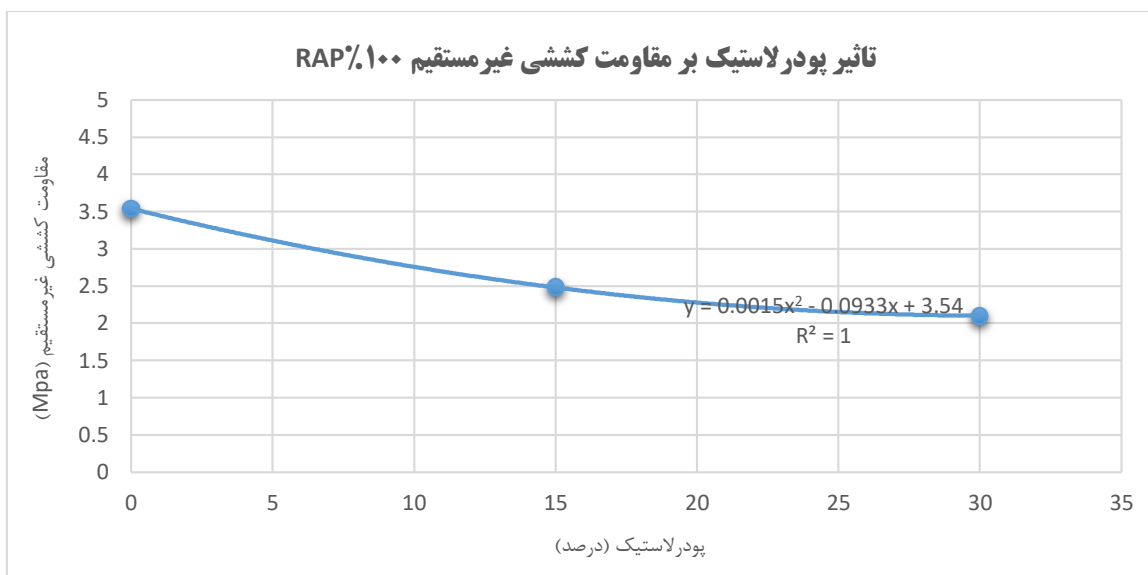
شکل ۵-۲۹: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم سرباره

۵-۶-۴ تأثیر ترکیب پودر لاستیک و آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت کششی غیرمستقیم:

جدول ۵-۲۳ تأثیر ترکیب پودر لاستیک و RAP را در مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داده است. مطابق انتظار هر دو ماده جایگزین تأثیر منفی بر مقاومت کششی دارند و روند تأثیر گذاری آنها در شکل ۵-۳۰ که یک روند نزولی بوده را نشان می دهد.

جدول ۵-۲۳: تأثیر پودر لاستیک بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه RAP ۱۰۰٪

مقاومت ۷ روزه (Mpa)	درصد پودر لاستیک
۳/۵۴	۱۰۰٪ پودر لاستیک-RAP
۲/۴۸	۱۵٪ پودر لاستیک-RAP
۲/۱	۳۰٪ پودر لاستیک-RAP



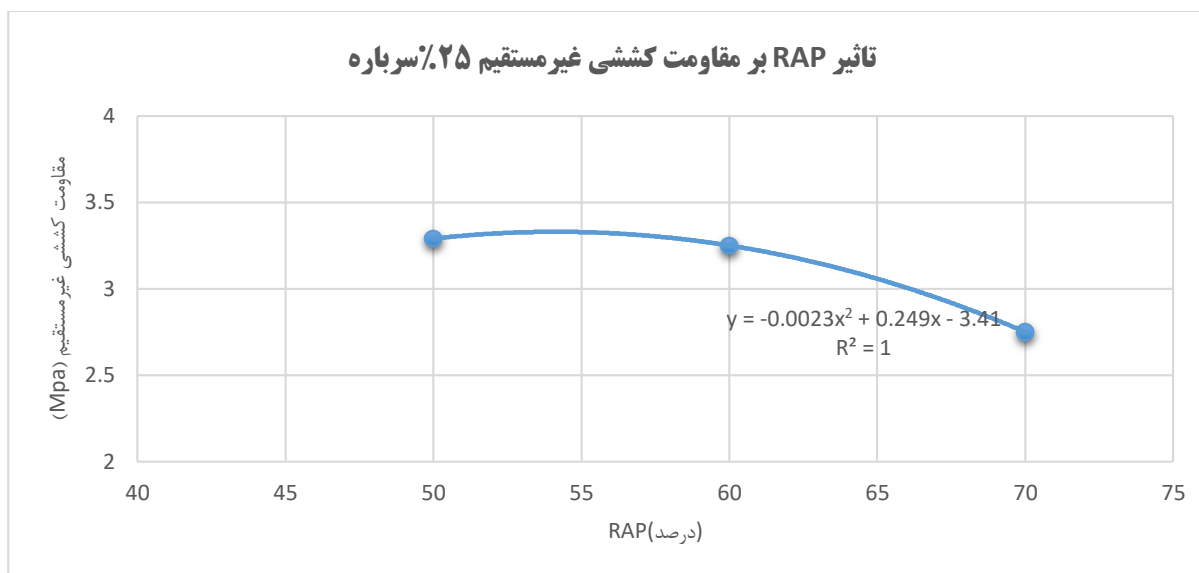
شکل ۵-۳۰: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ترکیبی پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

۵-۶-۵ تأثیر ترکیب سرباره و آسفالت بازیافتی (RAP) بر روی مقاومت کششی غیرمستقیم:

جدول ۵-۲۴ تأثیر ترکیبی RAP و سرباره را بر مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می دهد. از آنجاییکه متغیر RAP و پارامتر ثابت سرباره بوده است، تاثیرگذاری منفی قابل توجیه است. شکل ۵-۳۱ روند نزولی اثرگذاری RAP را در نمونه ترکیبی RAP و سرباره نشان می دهد.

جدول ۵-۲۴: تأثیر RAP بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ۲۵٪ سرباره

مقاومت ۷ روزه (Mpa)	درصد RAP
۳/۲۹	۵۰٪ RAP-سرباره ۲۵٪
۳/۲۵	۶۰٪ RAP-سرباره ۲۵٪
۲/۷۵	۷۰٪ RAP-سرباره ۲۵٪



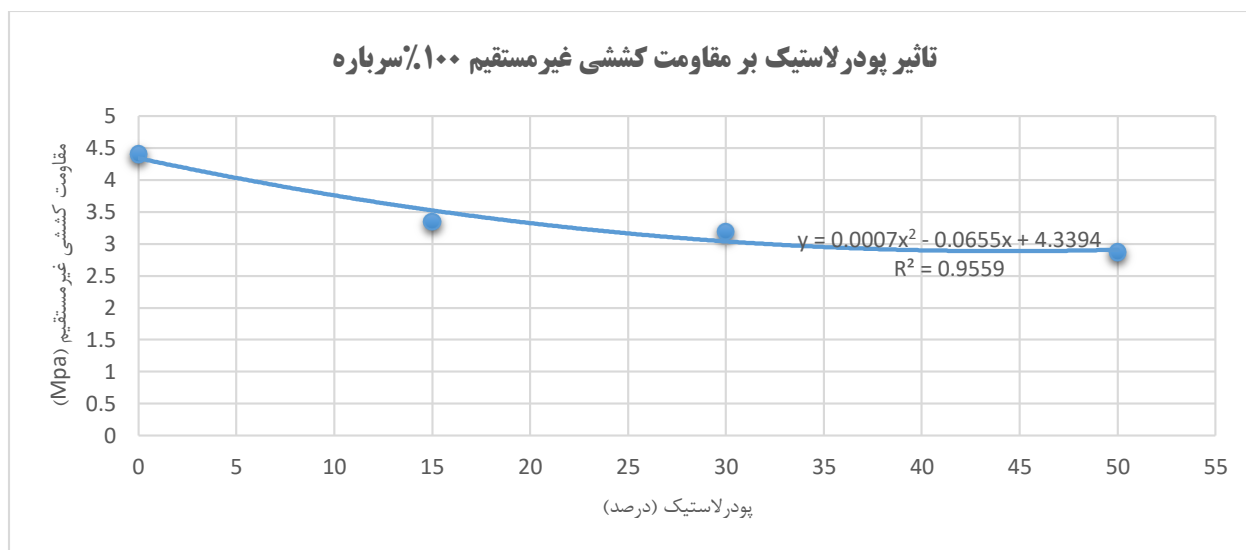
شکل ۵-۳۱: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ترکیبی سرباره اسفالت بازیافتی

۵-۶-۶ تأثیر ترکیب سرباره و پودر لاستیک بر روی مقاومت کششی غیر مستقیم:

همانطور که در بخش قبلی گفتیم سرباره تنها ماده جایگزینی بود که تاثیرگذاری مثبتی بر مقاومت کششی داشته است و پودر لاستیک نیز بدترین عملکرد را از خود نشان داده است. جدول ۵-۲۵ و شکل ۵-۳۲ تاثیرگذاری پودر لاستیک را بر نمونه ۱۰۰٪ سرباره نشان می دهند.

جدول ۵-۲۵: تأثیر پودر لاستیک بر مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ۱۰۰٪ سرباره

مقاومت ۷ روزه (Mpa)	درصد سرباره
۴/۴	۰٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره
۳/۳۵	۱۵٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره
۳/۱۹	۳۰٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره
۲/۸۷	۵۰٪ پودر لاستیک-۱۰۰٪ سرباره



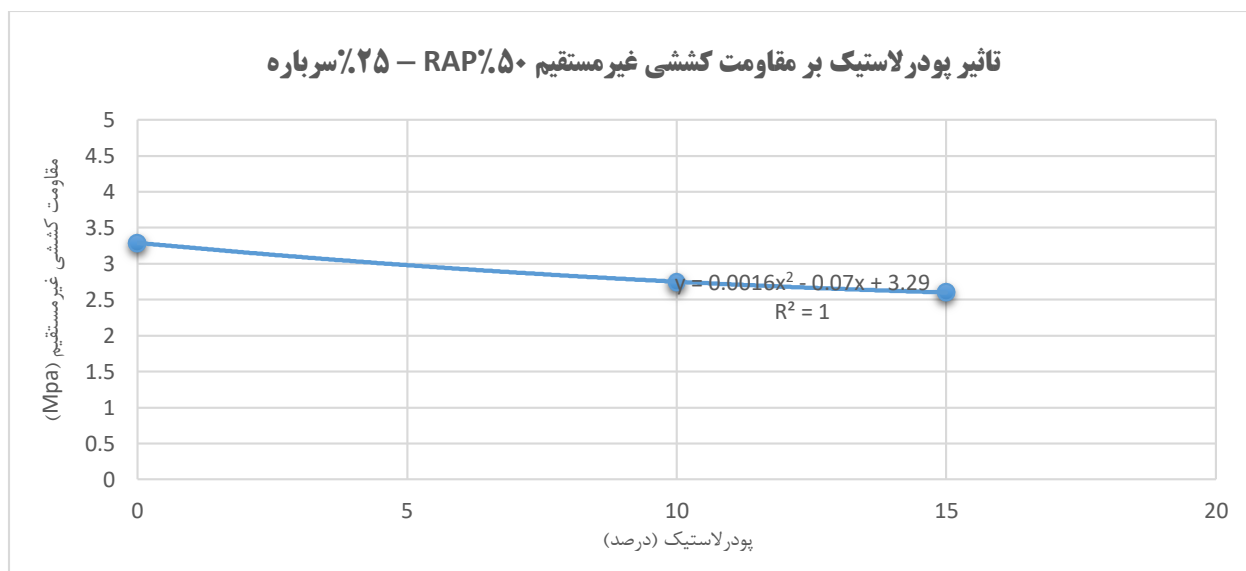
شکل ۵-۳۲: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ترکیبی سرباره پودر لاستیک

۵-۶-۷ تأثیر ترکیب سه گانه سرباره و پودر لاستیک و RAP بر روی مقاومت کششی غیرمستقیم:

جداول ۵-۲۶ و ۵-۲۷ و ۵-۲۸ مربوط به آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت حضور سه ماده جایگزین RAP و سرباره و پودر لاستیک می باشند که به ترتیب نمودارهای ۵-۳۳ و ۵-۳۴ و ۵-۳۵ روند تغییرات را نشان می دهند. جدول ۵-۲۶ و شکل ۵-۳۳ ترکیب سه گانه مواد جایگزین را با متغیر پودر لاستیک بر مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می دهد.

جدول ۵-۲۶: تأثیر پودر لاستیک بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ۲۵٪ سرباره ۵۰٪ RAP

درصد پودر لاستیک	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰٪ پودر لاستیک-۲۵٪ سرباره-RAP ۵۰٪	۳/۲۹
۱۰٪ پودر لاستیک-۲۵٪ سرباره-RAP ۵۰٪	۲/۷۵
۱۵٪ پودر لاستیک-۲۵٪ سرباره-RAP ۵۰٪	۲/۶

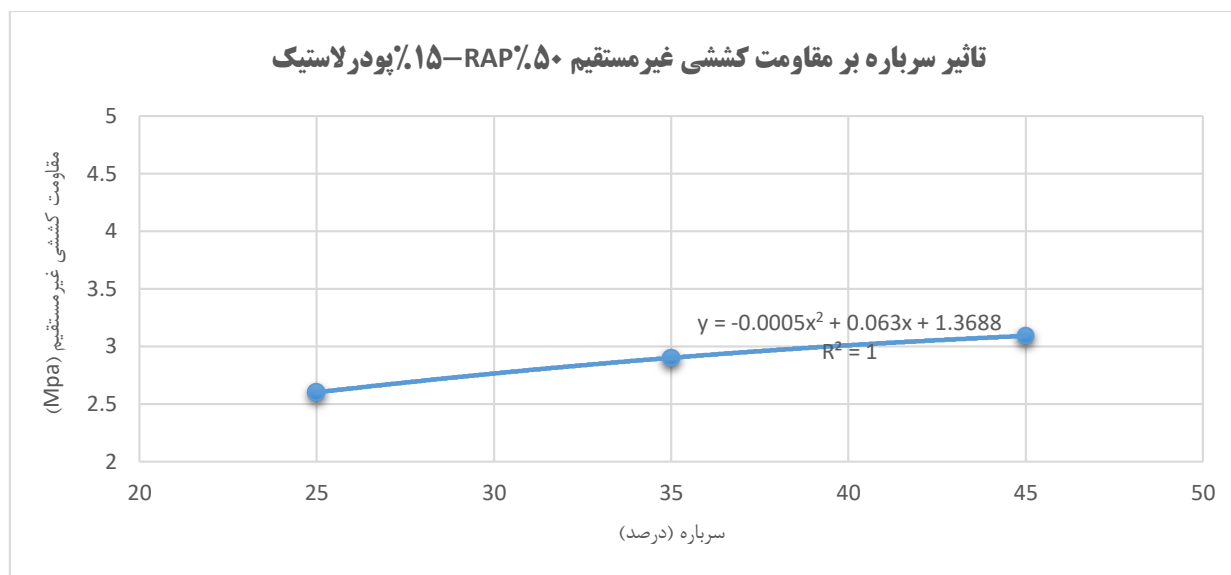


شکل ۵-۳۳: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

جدول ۵-۲۷ و شکل ۵-۳۴ ترکیب سه گانه مواد جایگزین را با متغیر سرباره بر مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می دهد.

جدول ۵-۲۷: تأثیر سرباره بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ۱۵٪ پودر لاستیک - ۵۰٪ RAP

درصد سرباره	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۲۵٪ سرباره-۱۵٪ پودر لاستیک-RAP ۵۰٪	۲/۶
۳۵٪ سرباره-۱۵٪ پودر لاستیک-RAP ۵۰٪	۲/۹
۴۵٪ سرباره-۱۵٪ پودر لاستیک-RAP ۵۰٪	۳/۰۹

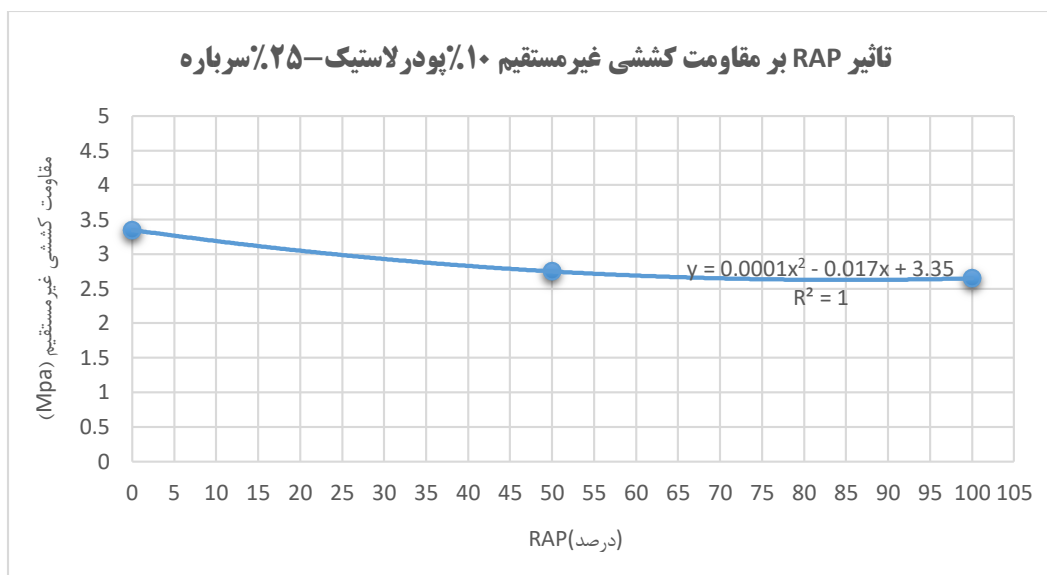


شکل ۵-۳۴: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

جدول ۵-۲۸ و شکل ۵-۳۵ ترکیب سه گانه مواد جایگزین را با متغیر RAP بر مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می دهد.

جدول ۵-۲۸: تأثیر RAP بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ۱۰٪پودرلاستیک - ۲۵٪سرباره

درصد RAP	مقاومت ۷ روزه (Mpa)
۰٪RAP-۱۰٪پودرلاستیک-۲۵٪سرباره	۳/۳۵
۵۰٪RAP-۱۰٪پودرلاستیک-۲۵٪سرباره	۲/۷۵
۱۰۰٪RAP-۱۰٪پودرلاستیک-۲۵٪سرباره	۲/۶۵



شکل ۵-۳: نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه سه گانه سرباره پودر لاستیک آسفالت بازیافتی

۵-۷ نتیجه گیری:

در این پژوهش بتن غلتکی با استفاده از مواد زائدی چون پودر لاستیک، آسفالت بازیافتی و سرباره کوره آهن پس از تعیین درصد رطوبت بهینه ساخته شد. با انجام آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم مقدار و تاثیر جایگزینی این مواد در بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این قسمت بصورت کلی بیان شده اند.

۱- استفاده از پودر لاستیک باعث کاهش مقاومت فشاری بر روی بتن سخت شده می شود و با افزایش آن این کاهش مشهودتر شده است. پودر لاستیک به جهت نرمی و انعطاف پذیری بر روی مقاومت خمشی عملکرد بهتری داشته است و تا ۱۵٪ جایگزینی با ریزدانه، مقاومت خمشی افزایش یافته است. با این حال استفاده از ۲۰٪ پودر لاستیک به مقاومت مورد نیاز فشاری و خمشی رسیده و استفاده از آن در ترکیب بتن غلتکی بلامانع است.

۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که استفاده از RAP تا ۵۰٪ عملکرد بتن غلتکی را بهبود می بخشد، و در درصدهای بالاتر موجب کاهش مقاومت شده ولی تا ۱۰۰٪ می توان آن را جایگزین درشت دانه کرد و به مقاومت فشاری مورد تایید رسید. عملکرد RAP بر روی مقاومت خمشی نیز رضایت بخش بوده و استفاده از آن موجب افزایش مقاومت خمشی شده است، بطوریکه ۱۰۰٪ RAP مقاومت بهتری از نمونه شاهد نشان داده است.

۳- سرباره با توجه به وزن مخصوص بالاتر از مصالح طبیعی و زبری و سختی آن در آزمایش مقاومت فشاری تاثیر مثبت داشته و تا ۱۰۰٪ استفاده از آن موجب بهبود مقاومت فشاری می شود. تاثیر RAP در خمش نیز رضایت بخش بوده و تا ۲۵٪ جایگزینی موجب افزایش مقاومت خمشی و در درصدهای بالاتر موجب کاهش مقاومت می

شود. این در حالیست که ۱۰۰٪ سرباره جایگزین درشت دانه مورد تایید بتن غلتکی بوده و می توان از آن به عنوان درشت دانه در بتن غلتکی استفاده کرد.

۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد که استفاده از پودرلاستیک و RAP تاثیر منفی بر نتایج گذاشته و مقاومت کششی را کاهش می دهد ولی استفاده از سرباره اثرگذاری مثبتی داشته و موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم می شود.

۵- عملکرد ضعیف پودرلاستیک را می توان با ترکیب مواد زائد دیگر در طرح اختلاط بهبود بخشید. در ترکیب پودرلاستیک با RAP نتایج مقاومت فشاری نشان داد که علاوه بر جایگزینی ۱۰۰٪ RAP با درشت دانه می توان ۳۰٪ پودرلاستیک را با ریزدانه جایگزین کرد. این در حالیست که این ترکیب حداقل مقاومت خمشی را نیز ارضا کرده و می تواند بعنوان یک ترکیب بهینه از پودرلاستیک و RAP استفاده گردد. همچنین نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نیز نشان از کاهش مقاومت در هنگام استفاده از این ترکیب را داشته است.

۶- در هنگام ترکیب سرباره با پودرلاستیک نیز نتایج حاکی از افزایش درصد پودرلاستیک داده اند. بطوریکه ۱۰۰٪ سرباره جایگزین درشت دانه با ۵۰٪ پودرلاستیک جایگزین ریزدانه مقاومت فشاری مناسبی داشته است ولی این ترکیب حداقل مقاومت خمشی را ارضا نکرده و نمی توان از این ترکیب در طرح اختلاط بتن غلتکی استفاده کرد. این در حالیست که ۱۰۰٪ RAP با ۱۵٪ پودرلاستیک مورد تایید بوده و می توان آن را بعنوان ترکیب بهینه سرباره و پودرلاستیک در اختلاط بتن غلتکی معرفی کرد. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نیز همانند ترکیب RAP و پودرلاستیک مقاومت را کاهش داده است.

۷- استفاده از ترکیب همزمان RAP و سرباره به جهت اینکه هر دو جایگزین درشت دانه شده اند، محدود می باشد. با افزایش درصد RAP در مقدار ثابت ۲۵٪ سرباره، مقاومت فشاری و خمشی کاهش داشته اند. نتایج مقاومت فشاری و خمشی نشان دادند که استفاده از ۷۰٪ RAP و ۲۵٪ سرباره در طرح اختلاط بتن غلتکی بلامانع است. مقاومت کششی نیز در هنگام استفاده از این ترکیب کاهش یافته است.

۸- در هنگام استفاده از هر سه ماده جایگزین، می توان به طرح اختلاط هایی مناسب دست یافت. افزایش پودرلاستیک و RAP منجر به کاهش مقاومت فشاری و افزایش سرباره موجب افزایش مقاومت فشاری در ترکیب همزمان شده است. ترکیبات ۱۰۰-RAP-۲۵ سرباره-۱۰ پودرلاستیک و ۵۰-RAP-۴۵ سرباره-۱۵ پودرلاستیک دو ترکیبی هستند که مورد تایید بتن غلتکی بوده و می توان در طرح اختلاط از آنها استفاده کرد.

۹-افزایش هر ماده در ترکیب سه گانه موجب کاهش مقاومت خمشی شده است. با افزایش RAP و پودرلاستیک مقاومت کششی غیرمستقیم روند کاهشی داشته و این در حالیست که با افزایش سرباره، روند مقاومت کششی غیرمستقیم در ترکیب سه گانه طرح اختلاط افزایشی بوده است.

۱۰-مدول الاستیسیته رابطه ای خطی با مقاومت فشاری داشته و با افزایش یا کاهش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته نیز افزایش یا کاهش می یابد.

۵-۸ پیشنهادها جهت انجام تحقیقات آینده

اگرچه عملکرد ضعیف پودرلاستیک را تا حدودی با RAP و سرباره جبران کردیم ولی استفاده از الیاف فولادی در افزایش مقاومت تاثیر بسزایی داشته و برای نمونه ای که چفت و بست ضعیفی بین مصالح اتفاق افتاده است، گزینه مناسبی می باشد.

ارزیابی دوام و خستگی روسازی بتن غلتکی حاوی مواد زائدی چون پودرلاستیک، آسفالت بازیافتی و سرباره از پارامترهای تاثیرگذار برای عمر روسازی و مقاومت در برابر عوامل جوی خواهد بود که بررسی آنها توصیه شده است.

ساخت بتن غلتکی در یک حجم بیشتر در آزمایشگاه و تراکم آن با کمپکتورهای مخصوص و کرگیری به جهت آزمایش مقاومت فشاری و خمشی از اقداماتی است که می تواند بین نحوه ساخت در آزمایشگاه و محل مقایسه مناسبی انجام دهد.

مراجع

- [۱] "ACI207 5R 11 . Report on Roller-Compacted Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice," 2011.
- [۲] "Portland Cement Association, "A Different Kind of Concrete," 2000.
- [۳] "ACI 325.10R-99, "State of the Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements," ACI Manual of Concrete Practice, Author, USA,2004.
- [۴] عامری م، (۱۳۸۸)، "مدیریت نوین روسازی"، پژوهشکده حمل و نقل.
- [۵] دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راهها - ضابطه شماره ۷۳۱-۱۳۹۶.
- [۶] "U.S.Army Corps of Engineers (USACE), "Roller compacted Concrete Pavement Design and Construction," Engineer Technical Letter 1110-3-475, Department of the Army, Washington, D.C.1995.
- [۷] ذاکری زاده ا، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "بررسی تأثیر الیاف مصنوعی ماکرو با پایه پلی پروپیلن و الیاف فلزی بر خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
- [۸] S. Saluja, K. Kaur, S. Goyal, and B. Bhattacharjee, "Assessing the effect of GGBS content and aggregate characteristics on drying shrinkage of roller compacted concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 201, pp. 72-80, 2019/03/20/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.179>.
- [۹] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, "Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP) – a review," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 7, pp. 1775-1798, 2020/10/02 2020, doi: 10.1080/14680629.2019.1579754.
- [۱۰] C. Chhorn, S. J. Hong, and S.-W. Lee, "A study on performance of roller-compacted concrete for pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 153 ,pp. 535-543, 2017/10/30/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.135>.
- [۱۱] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. V. Hazaree, H. Ceylan, and F. Bektas, "Guide for roller-compacted concrete pavements," 2010.
- [۱۲] شریعتی ع، قاسم زاده ح، (۱۳۹۴)، پایان نامه ارشد: "ارزیابی میدانی روسازی بتن غلتکی"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود.
- [۱۳] "ACI 325.10R-95, "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements," ACI Manual of Concrete Practice, USA, 2011.
- [۱۴] R. S. Rollings, " Design of Roller Compacted Concrete Pavements," *Proceedings of Roller Compacted Concrete II*, San Diego, Calif,1988.

- [١٥] A. Teymen, "The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete," 2007.
- [١٦] S. D. Tayabji, P. J. Nussbaum, and A. Ciolko, "Evaluation of Heavily Loaded Cement-Stabilized Bases," *Transportation Research Record*, vol. 839, pp. 6-11, 1982.
- [١٧] C. Jofre, "The use of roller compacted concrete for roads," 28406.١٩٩٣, . . . ٤٨
- [١٨] A. Nanni, D. Ludwig, and J. Shoenberger, "Roller compacted concrete for highway pavements," *Concrete International*, vol. 18, no. 5, pp. 33-38, 1996.
- [١٩] N. Ghafoori and Z. Zhang, "Sulfate resistance of roller compacted concrete," *Materials Journal*, vol. 95, no. 4, pp. 347-355, 1998.
- [٢٠] Delagrave, "Deicer Salt Scaling Resistance of Roller-Compacted Concrete Pavements." *ACI Materials Journal*, Vol. 94, pp. 164-169, 1997.
- [٢١] T. R. Naik, Y.-M. Chun, R. N. Kraus, L. Pennock, and B. Ramme, "Durability Of Roller-Compacted HVFA Concrete Pavements," in *Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, in Barcelona, Spain*, 2000.
- [٢٢] J. M. Abrams and J. L. Jackshaw, "An airport Apron and a county road," *Concrete International*, vol. 9, no. 2, pp. 30-36, 1987.
- [٢٣] J. E. Shoenberger, "User's Guide: Roller-Compacted Concrete Pavement," ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB, 1994.
- [٢٤] PIARC, "Technical Committees on Flexible Roads and on Concrete Roads," "SemiRigid Pavements", PIARC, Paris,1991.
- [٢٥] D. W. Pittman, "The effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements," ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB, 1989.
- [٢٦] Q. Liu, "Surface Texture of Roller Compacted Concrete Pavements." *Proceeding 8th International Symposium on Concrete Roads*, Portugal, 1998.
- [٢٧] R. Anderson, "Roller-Compacted Concrete Pavements Physical Properties," *CBI Report No. Ra*, vol. 3, p. 86, 1986.
- [٢٨] R. Anderson, "Swedish experiences with RCC," *Concrete International*, vol. 9, no. 2, pp. 18-24, 1987.

- [۳۹] N. Delatte ,N. Amer, and C. Storey, "Improved management of RCC pavement technology," *UTCA Report*, vol. 1231, p. 54, 2003.
- [۳۰] J. L. Larson, "Concrete kaleidoscope," *Concrete International*, Vol. 9, No.2, pp.62-67 1987.
- [۳۱] R. W. Piggott, "Ten Years of Heavy-Duty Pavement in Western Canada," *Concrete International*, vol. 9, no. 2, pp. 49-54, 1987.
- [۳۲] R. Holder, "“Roller Compacted Concrete Pavement Tactical Equipment Hardstadvd." Line Item 434”, Contract No., DACA83-C-0188, Fort Hood, Tex., Fort Worth District, Corps of Engineers,1984
- [۳۳] "American Society of Civil Engineers, “RCC Paves Municipal Street," *Civil Engineering—ASCE*, Vol. 57, No.11, pp.14, 1987.
- [۳۴] N. Banthia, M. Pigeon, J. Marchand, and J. Boisvert, "Permeability of roller compacted concrete," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, 1992.
- [۳۵] H. E. Fardin and A. G. d. Santos, "Roller Compacted Concrete with Recycled Concrete Aggregate for Paving Bases," *Sustainability*, vol. 12, no. 8, p. 3154, 2020.
- [۳۶] W. Sun, J. Liu, H. Qin, Y. Zhang, Z. Jin, and M. Qian, "Fatigue performance and equations of roller compacted concrete with fly ash," *Cement and concrete research*, vol. 28, no. 2, pp. 309-315, 1998.
- [۳۷] L. Courard, F. Michel, and P. Delhez, "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete," *Construction and building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 390-395, 2010.
- [۳۸] I. Aghayan, R. Khafajeh, and M. Shamsaei, "Life cycle assessment, mechanical properties, and durability of roller compacted concrete pavement containing recycled waste materials," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 595-606, 2021.
- [۳۹] E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, and M. Beygi, "Influence of cement contents on the fracture parameters of Roller compacted concrete pavement (RCCP)," *Construction and Building Materials*, vol. 289, p. 123159, 2021.

[۴۰] صابری کرهرودی ف،(۱۳۹۲)،پایان نامه کارشناسی ارشد "بررسی استفاده از خرده لاستیک بر روسازی های بتن غلتکی"،دانشکده مهندسی عمران،دانشگاه خواجه نصیر طوسی

[۴۱] صابری کرهرودی ف،حسینی ا، فخری م،(۱۳۹۵)،"تاثیر استفاده از خرده لاستیک بر خصوصیات بتن غلتکی"،مهندسی زیرساخت های حمل و نقل،سال دوم ، شماره دوم

[۴۲] عسگری ع، رهگذر م، (۱۳۹۷)، "ارزیابی آزمایشگاهی اثر استفاده از سرباره همراه با الیاف پلیمری و خرده های لاستیک در افزایش مقاومت فشاری بتن های غلتکی سرباره در روسازی راه"، موسسه آموزش عالی فرزنانگان

- [۴۳] M. Fakhri and F. Saberi. K, "The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement," *Journal of Cleaner Production*, vol. 129, pp. 521-530, 2016/08/15/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.017>.
- [۴۴] M. Fakhri and E. Amoosoltani, "The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 470-484, 2017/04/15/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136>.
- [۴۵] A. A. Salih and Z. M. Abed, "Effect of using Porcelanite as partial replacement of fine aggregate on roller compacted concrete with different curing methods," *Journal of Engineering*, vol. 22, no. 9, pp. 21-۲۰۱۶, ۳۵
- [۴۶] M. Adamu, B. S. Mohammed, N. Shafiq, and M. Shahir Liew, "Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller compacted concrete pavement," *Cogent engineering*, vol. 5, no. 1, p. 1436027, 2018.
- [۴۷] E. Ganjian, M. Khorami, and A. A. Maghsoudi, "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete," *Construction and building materials*, vol. 23, no. 5, pp. 1828-1836, 2009.
- [۴۸] P. Sukontasukkul, "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 1084-1092, 2009.
- [۴۹] D. Dodoo-Arhin, S. A. Mensah, A. Yaya, and B. Agyei-Tuffour, "Application of discarded rubber car tyres as synthetic coarse aggregates in light weight pavement concretes," *American Journal of Materials Science*, vol. 5, no. 4, pp. 75-83, 2015.
- [۵۰] B. S. Mohammed and M. Adamu, "Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica," *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 234-251, 2018/01/20/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>.
- [۵۱] A. Modarres and Z. Hosseini, "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material," *Materials & Design*, vol. 64, pp. 227-236, 2014.
- [۵۲] I. Boussetta, S. El Euch Khay, and J. Neji, "Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 24, no. 11, pp. 1729-1743, 2020.

- [٥٣] C. Settari, F. Debieb, E. H. Kadri, and O. Boukendakdji, "Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 617-621, 2015/12/30/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.039>.
- [٥٤] S. Debbarma, G. D. Ransinchung R.N, and S. Singh, "Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 508-525, 2019/02/28/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.047>.
- [٥٥] S. Debbarma, G. D. Ransinchung R.N, S. Singh, and S. K. Sahdeo, "Utilization of industrial and agricultural wastes for productions of sustainable roller compacted concrete pavement mixes containing reclaimed asphalt pavement aggregates," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 152, p. 104504, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104504>.
- [٥٦] B. Huang, X. Shu, and G. Li, "Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 10, pp. 2008-2013, 2005.
- [٥٧] Y. Bashkoul and H. Divandari, "Evaluate the use of recycled asphalt pavement (RAP) in the construction of roller compacted concrete pavement (RCC)," *Civil Engineering Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1157-1164, 2018.
- [٥٨] A. Ashteyat, M. Kirgiz, and B. AlTawallbeh, "Production of Roller Compacted Concrete Made of Recycled Asphalt Pavement Aggregate and Recycled Concrete Aggregate and Silica Fume," *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 1-16, 2021.
- [٥٩] S. S. Rahman and M. J. Khattak, "Mechanistic and microstructural characteristics of roller compacted geopolymer concrete using reclaimed asphalt pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-19, 2021.
- [٦٠] A. Ahmadi, M. K. Gogheri, M. Adresi, and E. Amoosoltani, "Laboratory evaluation of roller compacted concrete containing RAP," *Advances in concrete construction*, vol. 10, no. 6, pp. 489-498, 2020.
- [٦١] M. R. Rezaei, A. Abdi Kordani, and M. Zarei, "Experimental investigation of the effect of Micro Silica on roller compacted concrete pavement made of recycled asphalt pavement materials," *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-15, 2020.
- [٦٢] S. Debbarma and G. Ransinchung, "Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates—state of the art review," *Journal of Cleaner Production*, p. 125078, 2020.

- [٦٣] K. D. Smith, D. A. Morian, and T. J. Van Dam, "Use of Air-cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements: a Guide to Best Practice," United States. Federal Highway Administration, 2012.
- [٦٤] M. N.-T. Lam, S. Jaritngam, and D.-H. Le, "Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 4, ٢٠١٧ / ١٥ / ١١ / ٢٠١٧, ٤٩٥-٨٢doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.240>.
- [٦٥] H. Rooholamini, R. Sedghi, B. Ghobadipour, and M. Adresi, "Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 88-98, 2019/06/30/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.223>.
- [٦٦] M. Maslehuddin, A. M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, and M. Barry, "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes," *Construction and building materials*, vol. 17, no. 2, pp. 105-112, 2003.
- [٦٧] A. Mardani-Aghabaglou and K. Ramyar, "Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method," *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 356-364, 2013.
- [٦٨] S. I. Abu-Eishah, A. S. El-Dieb, and M. S. Bedir, "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region ", *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 249-256, 2012.
- [٦٩] N. Palankar, A. R. Shankar, and B. Mithun, "Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates," *Journal of cleaner production*, vol. 129, pp. 437-448, 2016.
- [٧٠] G. Calis and S. A. Yıldız, "Investigation of roller compacted concrete: Literature review," *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 63-74, 2019.
- [٧١] M. Raihan, G. Islam, and F. Chowdhury, "Evaluating compressive strength of roller compacted concrete (RCC) using steel slag (SS) aggregate."
- [٧٢] R. Toffolo, T. Moro, D. Santos, L. Costa, J. Mendes, and R. Peixoto, "Roller-Compacted Concrete Pavements Produced Entirely with Steelmaking Slag Aggregates," *ACI Materials Journal*, vol. 118, no. 4, 2021.
- [٧٣] "ACI 211.3R-02, Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete." ACI Manual of Concrete Practice", USA, 2002
- [٧٤] Ville, De Montréal (2002) "Béton compacte au rouleau (BCR)"Service de l'Environnement, DE LA Division Des Laboratoires. June 2002. p15.

- [۷۵] W. Malisch, "Roller compacted concrete pavements," *Concrete Construction*, vol. 33, no. 13, 1988.
- [۷۶] "PCA," Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements, Portland Cement Association, USA, 1987.
- [۷۷] K. D. Hansen and W. G. Reinhardt, *Roller-compacted concrete dams*. McGraw-Hill Companies, 1991.
- [۷۸] H. Y. Qasrawi, I. M. Asi, and H. A.-A. Wahhab, "Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength," *Cement and concrete research*, vol. 35, no. 2, pp. 267-276, 2005.
- [۷۹] مهرعلیزاده رضا، چینی مهدی، شکرچی زاده محمد، کهندل نیا مجتبی، آزاد شادی، بیهقی بهار، بنی اردلان رضا، (۱۳۹۳)،
"مروری بر روشهای مختلف طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی" . ششمین
 کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران
- [۸۰] "ASTM C33-13, "Standard Specification for Concrete Aggregates." ASTM International, USA, 2013.
- [۸۱] "ASTM D1557-11, "Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight). Relations of Soil-Cement Mixtures", ASTM International, USA, 2011.
- [۸۲] "C 39/C 39M – 05 , Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens ".
- [۸۳] *C496/C496M , Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [۸۴] "C 78 – 02 , Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading."

[۸۵] احمدی م، رضانیپور ع، (۱۳۹۹) مبحث نهم مقررات ملی: "طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه" ویرایش پنجم

Abstract

Rolling concrete pavement is a sub-branch of rigid pavements. The most prominent features of these pavements are high strength in the early ages, high execution speed and lower construction cost than other concrete pavements. In this research, it has been tried to use recycled materials that cause environmental pollution such as recycled asphalt, smelting iron slag and rubber powder as a substitute for non-renewable natural resources of stone materials. The main purpose of the research is to provide a mixing design with features beyond the mixing design with natural materials. For this purpose, by combining alternative materials and covering the shortcomings of each alternative material with another alternative material, we achieved the desired mixing design. From the obtained results, it can be concluded that 100% recycled asphalt can be replaced with coarse natural materials. Slag has a completely positive effect on the results and replacing it with natural materials is beneficial. Rubber powder can be replaced with fine-grained materials up to 20% and does not reach the minimum compressive and flexural strength in higher percentages. The negative effect of rubber powder on the performance of roller concrete mixtures can be compensated by increasing the percentage of slag and we can use this discarded material as a rock material along with slag. Therefore, by combining these three alternative materials, we try to achieve the final mixing plan with the highest possible percentage of alternative materials using the existing materials in Shahroud city. The results of compressive strength, flexural strength and indirect tensile strength tests showed that by replacing 100% recycled asphalt, we see a decrease of 17.68% and 15.91% in indirect compressive and tensile strength and a 26% increase in flexural strength. Also, with the replacement of 20% rubber powder, 28.3% and 58.27% decrease in compressive strength and indirect tensile strength and 3.45% increase in flexural strength occurred. In contrast to these two wastes, slag due to replacement with 100% natural coarse aggregates had 56% and 4.5% increase in compressive strength and indirect tensile strength and 2.46% decrease in flexural strength. We partially compensated for the weakness in rubber powder with a combination of rubber powder and slag, as well as a combination of rubber powder and recycled asphalt. Based on this, we have achieved two optimal mixing designs of 100% recycled asphalt with 30% rubber powder and also 100% slag with 15% rubber powder that can be used in the rolling concrete mixing design. Finally, the triple combination of 100% recycled asphalt - 25% slag and 10% rubber powder as a sample with all three alternative materials can be suggested for the use of waste in the mixing design.

Keywords: Roller concrete pavement, Optimal mixing design, Recycle materials, Recycle asphalt, Rubber powder, Furnace slag



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Roads and Transport Engineering

**Evaluation of mechanical properties of roller concrete pavement containing
slag, rubber powder and recycled asphalt**

By :

Milad Hajiebrahimi

Supervisor :

Dr. Seyed Ali Hosseini

October 2021