

بررسی دوام بتن غلتکی حاوی نسبت‌های مختلف حجمی ضایعات آسفالت در برابر شرایط محیطی مخرب

اشکان خدابنده لو^{۱*}، یاسر صفرعلیزاده^۲

* ۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران a.khodabandehlou@iau.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران yaseralizade4@gmail.com

چکیده

از گذشته تاکنون در ایران، احداث راه‌های آسفالتی رایج بوده و امروزه با حجم زیادی پسماند و نخاله‌های آسفالتی ناشی از تخریب و انقضای این مسیرها مواجه هستیم. این ضایعات عمدتاً به حاشیه و اطراف شهرها منتقل می‌شوند و سازوکار خاصی برای بازیافت آن در صنایع وجود ندارد. علاوه بر آن نو سازی راه‌ها و مسیرهای جدیدی که تحت بار ترافیکی سنگین قرار ندارند، لازم نیست با مصالح دسته اول و با کیفیت ساخته شوند. زیرا رویه فعلی باعث افزایش هزینه ساخت و تخریب معادن و منابع طبیعی می‌شود. در حالیکه می‌توان بسیاری از راه‌ها و مسیرهایی که در برابر عوامل محیطی مهاجم یا خورنده قرار ندارند، از رویه‌های مصالح بازیافت شده ساخته شوند. در این تحقیق برای ساخت بتن غلتکی از نسبت‌های مختلف حجمی سنگدانه آسفالت بازیافتی استفاده شد. بدین صورت از درشت‌دانه آسفالتی در نسبت‌های مختلف حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ بجای درشت‌دانه طبیعی در بتن غلتکی استفاده شد. سایر ضوابط و الزامات بر اساس استاندارد ملی ۱۴۸۳۰ در دستورکار قرار گرفت. همچنین برای افزایش تراکم و کیفیت بتن از میکرو سیلیس به میزان ۱۰٪ وزنی سیمان استفاده شد. آزمایشات انجام شده در این تحقیق شامل لس‌انجلس سنگدانه، اسلامپ، وزن مخصوص، ضریب تراکم، میزان جذب آب (۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت)، دوام در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان و بررسی دوام بتن در برابر شرایط اسیدی می‌باشد. جمع‌بندی نتایج این تحقیق نشان داد که میزان کاهش دوام طرح AS-10% عمدتاً کمتر از ۱۰٪ می‌باشد و می‌تواند در ساخت روسازی بتن غلتکی برای استفاده در مسیرهای کم تردد مورد استفاده قرار گیرد.

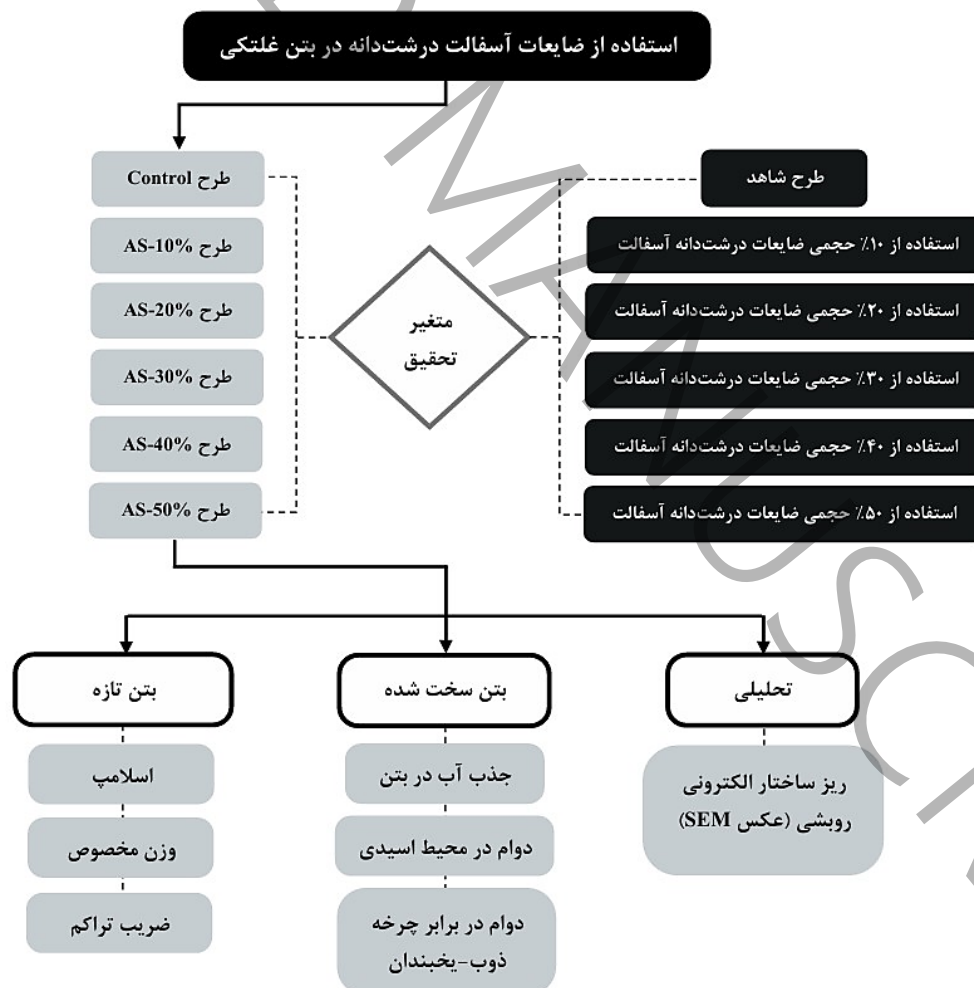
کلمات کلیدی

بازیافت آسفالت، بتن غلتکی، بتن سبز، دوام بتن، مصالح بازیافتی.

از دیرباز تاکنون، احداث راه‌های آسفالتی در ایران رایج بوده است. امروزه حجم زیادی از پسماندها و نخاله‌های آسفالتی ناشی از تخریب و پایان عمر این راه‌ها وجود دارد. اما سازوکار مشخص و مؤثری برای بازیافت این پسماندها در صنایع کشور تعریف نشده و بخش قابل توجهی از آن به حاشیه شهرها منتقل می‌شود یا میزان بازیافت نسبت به تولید بسیار ناچیز و کم‌اثر است [۱]. نوسازی راه‌ها و ایجاد مسیرهای جدیدی که تحت بار ترافیکی سنگین قرار ندارند، مانند راه‌های روستایی، مسیرهای عابرپیاده و دوچرخه‌سواری، نیازی به استفاده از مصالح درجه یک و با کیفیت ندارند. زیرا به‌کارگیری مصالح اولیه در این موارد علاوه بر افزایش هزینه ساخت، به تخریب منابع معدنی و طبیعی منجر می‌شود. در نتیجه، در مسیریایی که بار ترافیکی کمی دارند و در معرض عوامل مخرب محیطی نیستند، استفاده از رویه‌های اقتصادی مبتنی بر مصالح بازیافتی امکان‌پذیر و مقرون به صرفه است. تخمین زده شده است که سالانه حدود ۱۵۱ میلیون تن سنگ برای تولید شن و ماسه در ایران مصرف می‌شود [۲]. رشد تولید و مصرف بتن، نگرانی‌هایی در خصوص تخریب معادن سنگ که منابعی تجدیدناپذیر به شمار می‌روند، ایجاد کرده است. استفاده از مصالح بازیافتی در ساخت بتن، به ویژه برای کاربردهای غیرسازه‌ای، می‌تواند از هدررفت منابع طبیعی جلوگیری کرده و هزینه‌های ساخت را کاهش دهد. اگرچه افزودن آسفالت بازیافتی ممکن است بر دوام بتن غلظتی تأثیر منفی داشته باشد، اما استفاده محدود آن به جای شن طبیعی مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی دارد و به عنوان گامی مهم در جهت توسعه پایدار تلقی می‌شود. در کشورهای توسعه‌یافته، بهره‌برداری از منابع بازیافتی اولویت بالاتری نسبت به منابع اولیه داشته و با به‌کارگیری روش‌های علمی و کنترل شده، میزان پسماند به حداقل می‌رسد. در ایران، نرخ بازیافت پسماندهای ساختمانی و راه‌سازی کمتر از ۱٪ است. در حالیکه میزان تولید سالانه نخاله‌های ساختمانی در کشور حدود ۶۰ میلیون تن برآورد می‌شود. پیش‌بینی شده است که میزان جمع‌آوری ضایعات عمرانی تا سال ۱۴۰۵ بیش از دو برابر افزایش یابد [۳،۲].

با توجه به روند رشد فعلی، نگرانی‌هایی درباره تخریب و فرسایش معادن سنگ تجدیدناپذیر به وجود آمده است. استفاده از پسماندهای فرسوده جهت ساخت بتن بازیافتی برای کاربردهای غیرسازه‌ای می‌تواند از هدررفت حجم زیادی از منابع طبیعی جلوگیری کند. از سوی دیگر، توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل و احداث راه‌ها از اولویت‌های مهم کشور است. اجرای راه با بتن غلظتی نسبت به آسفالت تا ۲۴٪ مقرون به صرفه‌تر و هزینه ترمیم آن تا ۴۴٪ کمتر است. دوام و عمر بهره‌برداری این نوع راه تقریباً دو برابر راه آسفالتی برآورد می‌شود. بتن غلظتی همچنین مزایای غیرمستقیم محیط زیستی از جمله کاهش خطر تصادفات، مصرف سوخت و استهلاک لاستیک را دارد [۴،۵]. سوابق تحقیق نشان می‌دهد که عمده مطالعات صورت گرفته مرتبط با بازیافت ضایعات آسفالت در بتن محدود به رفتار مکانیکی، اهمیت اقتصادی یا مسائل زیست محیطی آن می‌باشد و کمتر به دوام آن در برابر شرایط محیطی مختلف پرداخته شده است. دبارماس و همکاران (۲۰۲۱) رفتار بتن غلظتی حاوی ضایعات آسفالت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد تغییر درصد، اندازه، سن و نوع ضایعات آسفالت تأثیر مستقیم بر مقاومت و دوام بتن غلظتی دارد و تا ۲۰٪ جایگزینی می‌توان بدون افت شدید مقاومت، مزایای زیست محیطی و اقتصادی قابل توجهی کسب کرد [۶]. قاسم‌زاده‌ج و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی رفتار بتن حاوی ضایعات آسفالتی با مقادیر مختلف لاتکس و دوده سیلیسی پرداخته و خواص مکانیکی، نفوذپذیری و ریزساختار بتن را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن لاتکس و دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری و بهبود ساختار ریز متخلخل بتن می‌گردد [۷]. سلطانی‌م و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی رفتار بتن با سنگدانه ریز ضایعات آسفالت و دوده سیلیسی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که وجود ضایعات آسفالت منجر به کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن می‌شود، اما استفاده از دوده سیلیسی قادر به جبران کاهش مقاومت و نزدیک کردن آن به بتن شاهد است [۸]. عموزاده‌م و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی استفاده از ضایعات آسفالت و سرباره فولاد در بتن غلظتی پرداختند و رفتار مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، انعطاف‌پذیری و چقرمگی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی ضایعات آسفالت، مقاومت فشاری کاهش یافته ولی انعطاف‌پذیری و جذب انرژی (چقرمگی) افزایش می‌یابد و تنها تا ۲۵٪ جایگزینی می‌توان الزامات استاندارد مقاومت را تأمین نمود [۹]. کریمی‌م و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی استفاده از درصدها مختلف ضایعات آسفالت در بتن با نسبت آب به سیمان مختلف پرداختند. در این تحقیق آزمایش‌های اسلامپ، تراکم پذیری، مقاومت فشاری در سنین مختلف انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش میزان ضایعات آسفالت در بتن، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد اما روانی و امکان تراکم بتن عملاً بدون تغییر باقی می‌ماند و خواص کارپذیری حفظ می‌شود [۱۰]. دیواندری و

همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای روسازی جاده‌های کم‌تردد، روستایی و پیاده‌روها معرفی کردند. همچنین، با تعیین درصد‌های بهینه خرده آسفالت بازیافتی (تا ۱۰٪) و میکروسیلیس (۸٪) نشان دادند که استفاده همزمان این دو ماده علاوه بر جبران افت مقاومت فشاری ناشی از افزودن ضایعات آسفالت، سبب صرفه‌جویی اقتصادی و مزایای زیست محیطی می‌شود [۱۱]. عاملی.ع و همکاران (۱۳۹۹) با ساخت بتن غلتکی حاوی خرده لاستیک و ضایعات آسفالت و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، نشان دادند که افزودن این ضایعات باعث افزایش انعطاف‌پذیری و چقرمگی بتن می‌شود. اما مقاومت شکست و ضریب شدت تنش در محل ترک کاهش می‌یابد و لازم است این موضوع در طراحی روسازی لحاظ گردد [۱۲]. جمع‌بندی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که افزودن ضایعات آسفالت در بتن غلتکی سبب کاهش مقاومت فشاری، کششی و افزایش تخلخل آن می‌شود. با این حال، استفاده از این روش در ساخت راه و معابر در شرایط اقلیمی ایران، که اکثراً مناطق کوهستانی و سردسیری با بارش برف و یخبندان است، نیازمند بررسی‌های بیشتری است. در کشورهای دیگر که کمبود منابع طبیعی وجود دارد، بیشتر راهسازی‌ها به صورت بتن غلتکی انجام می‌شود. اما در ایران، عمده راه‌ها آسفالتی بوده که عمر کوتاه‌تری نسبت به بتن غلتکی دارند. بنابراین حجم زیاد ضایعات آسفالت نیازمند راهکارهای بازیافت و توسعه راه‌های طولانی مدت است. در این راستا، استفاده از ضایعات آسفالت در بتن غلتکی، ضمن کاهش هزینه‌ها و پسماند، می‌تواند راهکاری موثر باشد، اما قبل از اجرای گسترده، نیازمند آزمایشات و ارزیابی‌های دقیق است و نقش میکروسیلیس در بهبود دوام این بتن نیز باید بررسی شود. شکل شماره ۱ فلوجارت مراحل آزمایشگاهی در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱ فلوجارت مراحل آزمایشگاهی در این تحقیق

Figure 1 Flowchart of laboratory steps in this research

۲- مواد و مصالح

۱-۲ - شن

شن مصرفی جهت ساخت بتن مورد آزمایش در این تحقیق، شن با دانه بندی شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می باشد و از معدن دوکوهک استان فارس تهیه شده است. وزن مخصوص ظاهری در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) ۲۷۶۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و میزان جذب آب درشت دانه نیز برابر با ۱/۶٪ می باشد. همچنین میزان درصد سایش شن مصرفی طبق استاندارد ملی ۴۸۸ به روش لس آنجلس، ۱۷٪ محاسبه گردید.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

Table 1 Specifications of sand used in concrete production

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	سایش	وزن مخصوص خشک	میزان جذب آب
درشت دانه شکسته	mm	%	kg/m ³	%
	۱۹	۱۷	۱۷۵۰	۱/۶

۲-۲ - ماسه

ماسه مصرفی جهت ساخت بتن در این تحقیق از معادن موجود در منطقه دوکوهک فارس تهیه شده است. ماسه مصرفی دارای حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلیمتر و بوده که وزن مخصوص ظاهری در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)، ۲۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و جذب آب ۲/۳٪ و مدول نرمی ۳/۱ می باشد.

جدول ۲ مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

Table 2 Specifications of sand used in concrete manufacturing

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص خشک	جذب آب
			kg/m ³	%
ماسه	۴/۷۵	۳/۱	۱۵۸۰	۲/۳

۳-۲ - آسفالت بازیافتی

آسفالت بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق از محل دپو نخاله های ناشی از تخریب آسفالت جمع آوری شد. دانه بندی آن مطابق استاندارد ASTM-C136 انجام گرفت و حداکثر اندازه سنگدانه آسفالتی ۱۹ میلی متر در نظر گرفته شد. میزان جذب آب سنگدانه آسفالت بازیافتی طبق استاندارد ASTM-C128 برابر با ۲/۱٪ تعیین گردید. بنابراین درشت دانه آسفالت بازیافتی نسبت به درشت دانه طبیعی جذب آب بیشتری دارد. هرچند در برخی مطالعات پیشین، به دلیل چسبندگی مواد قیری به سطح سنگدانه آسفالتی، جذب آب آن کمتر گزارش شده است [۱۹]. به نظر می رسد علاوه بر نوع سنگدانه، نوع قیر مصرفی و کیفیت آسفالت بازیافتی نیز در میزان جذب آب تأثیرگذار باشند. با این حال تمامی مراجع تأیید کرده اند که سنگدانه های بازیافتی دارای تخلخل بیشتر، جذب آب بالاتر و چگالی کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی هستند [۲۰-۲۲].

در این تحقیق، سنگدانه های آسفالت بازیافتی بدون انجام فرآوری ویژه، به صورت جایگزینی حجمی به جای شن طبیعی در بتن استفاده شدند. هدف اصلی، بازیافت سریع آسفالت در بتن و بررسی تأثیر آن بر دوام بتن غلتکی بود، بنابراین از هر گونه فرآوری خاصی مانند حذف آلودگی های سطحی یا زدودن قیر از سطح سنگدانه آسفالتی خودداری شد. این روش به منظور شبیه سازی شرایط بازیافت انبوه آسفالت در بتن اتخاذ گردید. لازم به ذکر است که سنگدانه آسفالتی بازیافتی به دلیل فرسودگی بیشتر، چگالی کمتری نسبت به درشت دانه طبیعی دارد. همچنین، با توجه به آلودگی آن به مواد قیری و پلیمری، جذب آب آن کمتر از سنگدانه طبیعی است. همچنین

میزان درصد سایش سنگدانه آسفالت بازیافتی مصرفی در این تحقیق طبق استاندارد ملی ۴۸۸ به روش لس آنجلس، ۴۲٪ محاسبه گردید. این مهم ناشی از استهلاک و خستگی سنگدانه، قرار گرفتن در معرض سیکل یخبندان و عوامل جوی مختلف در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. سایر مشخصات سنگدانه آسفالتی مصرفی در جدول شماره ۳ ذکر شده است.

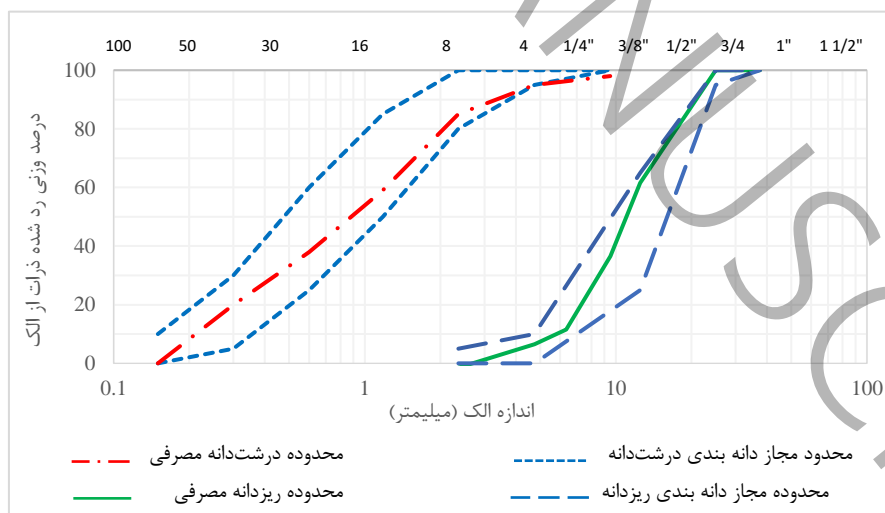
جدول ۳ مشخصات فیزیکی آسفالت بازیافتی در این تحقیق

Table 3 Physical characteristics of recycled asphalt in this research

نوع سنگدانه	اندازه	سایش	وزن مخصوص خشک	میزان جذب آب
آسفالت بازیافتی آلوده به مواد قیری	mm ۱۹ - ۴/۷۵	٪ ۴۲	kg/m ³ ۱۲۴۰	٪
				۲/۱

۴-۲ - دانه بندی

نسبت حجمی سنگدانه‌ها در بتن غلتکی معمولاً بین ۷۵٪ تا ۸۵٪ است. بنابراین، سنگدانه تأثیر زیادی بر خواص بتن تازه و سخت شده دارد. ابعاد سنگدانه‌ها را می‌توان به سه دسته درشت، ریز و بسیار ریز (نرمه) تقسیم کرد. سنگدانه‌های درشت با ابعاد اسمی بین ۳۸ تا ۷۵ میلی‌متر در بتن غلتکی به کار می‌روند. به طوری که ضخامت لایه بتن غلتکی باید حداقل سه برابر بزرگ‌ترین اندازه اسمی این ذرات باشد. توزیع دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز نقش مهمی در کیفیت خمیر سیمان و قابلیت تراکم‌پذیری بتن غلتکی ایفا می‌کند. این پارامتر بر رفتار آب و مواد سیمانی در پر کردن فضاهای خالی و پوشاندن ذرات نیز اثرگذار است. در ترکیباتی با نسبت سیمان پایین، معمولاً میزان نرمه (ذرات عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر) باید بیشتر در نظر گرفته شود. نسبت نرمه در بتن غلتکی بین ۲٪ تا ۸٪ حجم کل سنگدانه‌ها است که معمولاً بیش از ۵٪ می‌باشد [۲۳]. در آزمایش دانه‌بندی، مصالح سنگی با استفاده از لرزه و عبور از مجموعه‌ای از الک‌های مختلف، شماره‌گذاری شده و میزان دانه‌های باقی‌مانده روی هر الک تعیین گردید. مطابق استاندارد ASTM-C136، دانه‌بندی توسط الک‌های استاندارد انجام شد. در این روش، درصد تجمعی عبور ذرات از هر الک محاسبه می‌شود. این مقادیر که به ترتیب شماره‌گذاری شده‌اند، با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه گردیدند. در شکل مربوط، محور عمودی نشان‌دهنده درصد تجمعی عبور ذرات و محور افقی نمایانگر اندازه یا شماره الک است.



شکل ۲ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

Figure 2: Sand and gravel grading used to make concrete and its compliance with the ASTM-C33 standard

۵-۲ - سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق تیپ ۲ فارس نو می باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مربع است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی به ترتیب به شرح جدول شماره ۴ و ۵ است که بر اساس مشخصات منتشر شده توسط شرکت تولیدکننده ارائه شده است [۲۶].

جدول ۴ ساختار شیمیایی سیمان مصرفی [۲۶]

Table 4 Chemical analysis of cement used [26]

C ₃ S	C _a O	SO ₃	MgO	FE ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	SiO ₂
% ۲۲/۶۸	% ۶۰/۴۶	% ۱/۳۵	% ۲/۲۰	% ۳/۹۵	% ۴/۷۰	% ۲/۹۰

جدول ۵ مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی [۲۶]

Table 5 Physical characteristics of cement used [26]

وزن مخصوص (بلین)	مقاومت فشاری کیلوگرم بر سانتیمتر مربع			زمان گیرش دقیقه		انبساط اولیه (اتوکلاو)	سطح مخصوص (بلین)
	۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	نهایی	اولیه	%	
gr/cm ³	۴۲۰	۳۰۴	۱۸۵	۱۸۵	۱۵۰	۰/۰۷	cm ² /gr
۳/۱							۲۸۵۰

۶-۲ - میکروسیلیس

میکروسیلیس نوعی پوزولان محسوب می شود که بعنوان مکمل سیمان برای افزایش کیفیت بتن مورد استفاده قرار می گیرد. این ماده پوزولانی بصورت طبیعی و مصنوعی قابل تهیه می باشد. میکروسیلیس محصول جانبی تولید فلز سیلیسم یا آلیاژهای فروسیلیسم در گدازه خانه های کوره های قوس الکتریکی است. همچنین میکروسیلیس امکان جداسازی را کاهش می دهد. میکروسیلیس در بتن تازه باعث افزایش چسبندگی و کاهش اسلامپ بتن می شود که این مهم در بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به آنکه در سایر تحقیقات گذشته گزارش شده که بازیافت آسفالت در بتن موجب افزایش تخلخل و افت کیفیت بتن می شود، در این تحقیق با هدف افزایش کیفیت و تراکم بتن از میکروسیلیس استفاده شد [۷-۱۲]. میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق بصورت آماده خریداری شد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن به شرح جدول شماره ۶ و ۷ می باشد.

جدول ۶ مشخصات فیزیکی میکروسیلیس مصرفی

Table 6 Physical characteristics of micro silica used

Micro Silica	نماد
پودر جامد پوزولان	شکل ظاهری
خاکستری روشن	رنگ
بالای ۹۰٪	خلوص
۱ > μm	حداکثر اندازه
۲۷۰۰ kg/m ³	وزن مخصوص
کروی و غیر کریستاله (آمورف)	شکل ذرات
ایران	کشور سازنده
صنایع فروآلیاژ ایران (I.F.I)	نام شرکت ارائه دهنده محصول

جدول ۷ مشخصات فیزیکی میکروسیلیس مصرفی

Table 7 Physical characteristics of micro silica used

نماد عنصر	نام عنصر	میزان عنصر
SiO ₂	اکسید سیلیس	۹۳/۶
Fe ₂ O ₃	اکسید سوم آهن	۰/۹
Al ₂ O ₃	اکسید سوم آلومینیوم	۱/۳
CaO	اکسید کلسیم	۰/۵
MgO	اکسید منیزیم	۱
SO ₃	اکسید سولفوریک	۰/۴
K ₂ O	اکسید پتاسیم	۱
Na ₂ O ₃	اکسید سدیم	۱/۳

شکل شماره ۳ برخی از مصالح مورد استفاده جهت ساخت بتن در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳ مصالح مصرفی جهت ساخت بتن

تصاویر به ترتیب از راست به چپ مربوط به دانه‌بندی درشت‌دانه، دانه‌بندی ریزدانه، آسفالت ضایعاتی و میکروسیلیس می‌باشد

Figure 3 Materials used to make concrete

The images, from right to left, are for coarse aggregate, fine aggregate, waste asphalt, and micro silica

۳- طرح مخلوط

در این تحقیق برای ساخت بتن غلتکی از نسبت‌های مختلف حجمی آسفالت بازیافتی استفاده شد. از آنجایی که وزن مخصوص سنگدانه طبیعی با سنگدانه آسفالت بازیافتی یکسان نمی‌باشد، از روش طرح مخلوط حجمی استفاده شد. در روش حجمی، جایگزینی درشت‌دانه یا پیمانانه صورت می‌گیرد سپس وزن آن توزین می‌گردد. نسبت‌های جایگزینی آسفالت بازیافتی بصورت ۰/۱۰، ۰/۲۰، ۰/۳۰، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ حجمی درشت‌دانه طبیعی در بتن غلتکی تعیین شد. سایر ضوابط و الزامات بر اساس استاندارد ملی ۱۴۸۳۰ در دستورکار قرار گرفت. عیار سیمان مصرفی ۳۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، حداکثر اندازه اسمی درشت‌دانه ۱۹ میلیمتر، نسبت آب به سیمان ۰/۴۳ در نظر گرفته شد. از آنجایی که برای افزایش کیفیت بتن غلتکی توصیه شده از ریزدانه یا فیلر بیشتری استفاده شود در این تحقیق از میکروسیلیس استفاده شد. طبق توصیه استاندارد مینا، حداکثر میزان مجاز استفاده از میکروسیلیس ۰/۱۰ وزنی سیمان می‌باشد [۲۳]. جدول شماره ۹ میزان مقادیر مصرفی برای ساخت هر متر مکعب بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۸ طرح اختلاط و مقادیر وزنی مصالح برای ساخت هر متر مکعب بتن

Table 8 Mixing plan and weight values of materials for making each cubic meter of concrete

اسلامپ	وزن مخصوص	نسبت حجمی آسفالت به شن	آب	میکروسیلیس	ماسه	آسفالت بازیافتی	شن	سیمان	نام	ردیف
cm	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³		
۰	۲۴۲۸	۰	۱۵۰	۳۵	۱۳۵۰	۰	۵۵۰	۳۵۰	CONTROL	۱
۰	۲۴۱۷	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱۳۵۰	۳۹	۴۹۵	۳۵۰	AS-10%	۲
۰	۲۴۰۰	۲۰	۱۵۰	۳۵	۱۳۵۰	۷۸	۴۴۰	۳۵۰	AS-20%	۳
۰	۲۳۸۵	۳۰	۱۵۰	۳۵	۱۳۵۰	۱۱۷	۳۸۵	۳۵۰	AS-30%	۴
۰	۲۳۶۸	۴۰	۱۵۰	۳۵	۱۳۵۰	۱۵۶	۳۳۰	۳۵۰	AS-40%	۵
۰	۲۳۵۱	۵۰	۱۵۰	۳۵	۱۳۵۰	۱۹۵	۲۷۵	۳۵۰	AS-50%	۶



شکل ۴ جایگزینی حجمی درشت‌دانه آسفالت ضایعاتی با شن طبیعی

شکل شماره ۱ الی ۶ به ترتیب نسبت سنگدانه طرح مخلوط CONTROL, AS10%, AS20%, AS30%, AS40%, AS50% را نشان می‌دهد.

Figure 4 Volumetric replacement of waste asphalt coarse aggregate with natural sand. Figures 1 to 6 show the aggregate proportions of the CONTROL, AS10%, AS20%, AS30%, AS40%, and AS50% mix designs, respectively

۴- برنامه آزمایشگاهی

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل تعیین اسلامپ، تراکم، وزن مخصوص، جذب آب اولیه و نهایی (در زمان‌های ۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت)، دوام در برابر شرایط اسیدی (پس از ۳۰ و ۶۰ روز) و دوام در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان (۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه) می‌باشد. برنامه آزمایشگاهی شامل ساخت ۷۸ نمونه است که از این میان، ۶ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر جهت تعیین میزان جذب آب، ۳۶ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر برای آزمون دوام در برابر شرایط اسیدی، ۳۶ نمونه مکعبی با همان ابعاد جهت آزمون دوام در برابر چرخه ذوب-یخبندان ساخته شدند. برای آزمایش‌های دوام در برابر شرایط اسیدی و چرخه‌های ذوب-یخبندان، نمونه‌های بتن پس از سپری شدن ۲۸ روز عمل‌آوری مورد استفاده قرار گرفتند و هر طرح مخلوط با سه نمونه آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول شماره ۹ استاندارد روش اجرای هر آزمایش، تعداد نمونه‌ها بر حسب تفکیک آزمایش، ابعاد و نوع نمونه‌های بتن و شرح کامل آزمون‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۹ شرح آزمایش، نوع و تعداد نمونه و شماره استاندارد آزمایش بکار رفته در این تحقیق

Table 9: Description of the experiment, type and number of samples, and standard test number used in this study

ردیف	نام آزمایش	استاندارد آزمایش	تعداد/حجم نمونه	ابعاد نمونه (سانتیمتر)	نوع نمونه
۱	اسلامپ بتن غلتکی	ASTM-C143	ظرف استاندارد اسلامپ		
۲	لس آنجلس سنگدانه	ISIRI-448	۳ کیلوگرم سنگدانه با ۸ گوی فولادی		
۳	ضریب تراکم بتن غلتکی	BS-EN-1881-103	حدود ۱۶ کیلوگرم بتن تازه		
۴	وزن مخصوص بتن تازه	ASTM-C138	۵/۵ لیتر بتن تازه		
۵	جذب آب بتن	ASTM-C642	۶ عدد	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۶	چرخه ذوب-انجماد	ASTM-C666-B	۳۶ عدد	۱۵×۱۵×۱۵	مکعبی
۷	دوام در برابر اسید	ASTM-C267	۳۶ عدد	۱۵×۱۵×۱۵	مکعبی

از آنجایی که میزان جذب آب سنگدانه طبیعی و آسفالت بازیافتی یکسان نمی‌باشد، کلیه سنگدانه‌ها و آسفالت بازیافتی بصورت کاملاً خشک در خلایه ریخته شدند. برای این منظور ابتدا سنگدانه‌های طبیعی و آسفالت بازیافتی طی مدت ۳۰ ثانیه با یکدیگر مخلوط شدند سپس مقداری آب و سیمان در خلایه ریخته شد و طی مدت ۱ دقیقه اختلاط صورت گرفت. در نهایت میکروسیلیس و باقیمانده آب در خلایه ریخته شد و به مدت ۴ دقیقه دیگر اختلاط صورت گرفت. در پایان، آزمایش اسلامپ، تراکم و وزن مخصوص انجام شد و پس از آن نمونه‌برداری آغاز شد. بدین ترتیب در هر قالب، سه مرحله بتن ریخته شد و در هر مرحله توسط رامر ۲۵ ضربه دورانی برای ایجاد تراکم وارد شد. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰+ تا ۲۳+ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس به حوضچه آب انتقال یافتند. نمونه‌های مذکور به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب در دمای ثابت ۲۳ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. پس از آن به مدت ۵ ساعت در دمای محیط بیرون (دمای بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند تا آب سطحی آن خشک گردد و سپس برای انجام آزمایشات دسته‌بندی شدند.

شکل شماره ۵ مربوط به انجام آزمایش وزن مخصوص، اسلامپ و ضریب تراکم بتن غلتکی می‌باشد.



شکل ۵ آزمایش‌های مرتبط با بتن تازه

تصاویر به ترتیب از راست به چپ مربوط به آزمایش وزن مخصوص، آزمایش اسلامپ و ضریب تراکم بتن غلتکی می‌باشد

Figure 5 Tests related to fresh concrete

The images, from right to left, are for the specific gravity test, slump test, and compaction coefficient of roller concrete

۵- یافته‌ها

۵-۱- ضریب تراکم

به منظور دستیابی به حداکثر تراکم در بتن غلتکی، لازم است که بتن از کارایی مناسبی برخوردار باشد. یکی از شیوه‌های ارزیابی میزان تراکم بتن، آزمایش تعیین ضریب تراکم است که به کمک آن می‌توان درجه تراکم بتن را مشخص نمود. در این تحقیق، آزمایش ضریب تراکم طبق استاندارد BS-EN-1881-103 انجام شد. در این روش میزان تراکم بتن غلتکی بر اساس نسبت چگالی تعیین می‌شود. همچنین انتخاب درجه کارایی بتن تابع شرایط محیطی، روش‌های اجرا و الزامات پروژه‌ای بوده و برای هر نوع بتن‌ریزی مشخص می‌گردد. در جدول شماره ۱۰، رابطه‌ای تقریبی میان درجه کارایی، ضریب تراکم و کاربرد ضریب تراکم برای بتن‌های مختلف ارائه شده است، که می‌تواند به عنوان راهنمای انتخاب درجه کارایی مورد نیاز برای انواع پروژه‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱۰ دسته بندی کاربری بتن بر حسب ضریب تراکم

Table 10: Concrete application classification according to density coefficient

موارد استفاده و کاربرد بتن	ضریب تراکم	درجه کارایی
رویه بتنی جاده‌ها که عمل تراکم آن‌ها از طریق ارتعاش با ماشین‌های قوی انجام می‌گیرد. بتن‌های در حد کارایی بیشتر این گروه را در بعضی مواقع می‌توان با ماشین‌های دستی متراکم نمود.	$0.78 <$	خیلی کم
رویه بتنی جاده‌ها عمل تراکم آن‌ها از طریق ارتعاش با ماشین‌های دستی صورت می‌گیرد. بتن‌های در حد کارایی بیشتر این گروه ممکن است در جاده‌ها بصورت دستی متراکم نمود. پی‌های با بتن حجیم بدون لرزاندن و قطعات بتن آرمه با فولاد کم با لرزش متراکم می‌شوند.	$0.85 <$	کم
بتن‌های این گروه، دال‌های سطحی می‌باشند که حاوی مصالح سنگ شکسته می‌باشند. بتن آرمه با فولاد به مقدار عادی این گروه با دست و بتن آرمه با فولاد زیاد این گروه با لرزاندن متراکم می‌گردند.	$0.92 <$	متوسط
مواد مصرفی این گروه بر روی سازه‌هایی است که فولاد زیاد دارند و عمل لرزش برای تراکم آن‌ها مناسب نیست.	$0.95 <$	زیاد

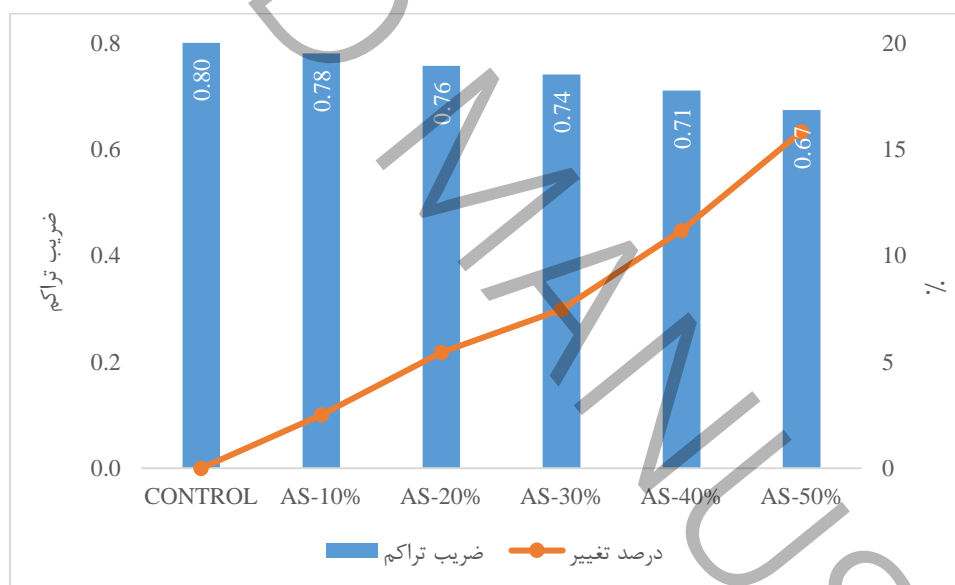
جدول شماره ۱۱ نتایج حاصل از انجام آزمایش ضریب تراکم بتن را نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید که میزان ضریب تراکم بتن غلتکی با افزایش مقدار آسفالت بازیافتی کاهش می‌یابد که ناشی از عدم چسبندگی مناسب سنگدانه آسفالت بازیافتی به خمیره بتن تازه و کاهش چگالی بتن نسبت حجم می‌باشد. بطوریکه در طرح 10%, 20%, 30%, 40%, 50% AS-10% میزان ضریب تراکم

نسبت به نمونه CONTROL به ترتیب به میزان ۲/۵٪، ۵/۴٪، ۷/۵٪، ۱۱/۲٪ و ۱۵/۸٪ کاهش یافته است. شکل شماره ۶ میزان تغییرات ضریب تراکم نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

جدول ۱۱ نتایج آزمایش ضریب تراکم بتن غلتکی

Table 11 Results of roller compaction coefficient test of concrete

ردیف	نام طرح	وزن اولیه (kg)	وزن ثانویه (kg)	ضریب تراکم	درصد تغییر (%)	نتیجه درجه کارایی
۱	CONTROL	۱۶/۵	۱۳/۲	۰/۸۰	۰	کم
۲	AS-10%	۱۵/۹	۱۲/۴	۰/۷۸	۲/۵	خیلی کم
۳	AS-20%	۱۵/۶	۱۱/۸	۰/۷۶	۵/۴	خیلی کم
۴	AS-30%	۱۵/۴	۱۱/۴	۰/۷۴	۷/۵	خیلی کم
۵	AS-40%	۱۵/۲	۱۰/۸	۰/۷۱	۱۱/۲	خیلی کم
۶	AS-50%	۱۵	۱۰/۱	۰/۶۷	۱۵/۸	خیلی کم



شکل ۶ نتایج آزمایش ضریب تراکم بتن غلتکی

Figure 6 Results of roller compaction coefficient test of concrete

۲-۵ - جذب آب بتن سخت شده

آزمایش جذب آب اولیه و نهایی طبق استاندارد ASTM-C642 بر روی نمونه‌های ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه انجام شد. نتایج این آزمایش نشان داد که افزودن آسفالت بازیافتی در بتن غلتکی، میزان جذب آب اولیه و ثانویه را افزایش می‌دهد. این مهم ناشی از دو عامل تخلخل بالا و جذب آب بالاتر آسفالت بازیافتی در مقایسه با درشت‌دانه طبیعی می‌باشد. با بررسی و مقایسه نتایج سایر تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود که میزان جذب آب سنگدانه بازیافتی بیشتر از سنگدانه آسفالتی بازیافتی می‌باشد [۱۰، ۹]. زیرا قیر و سایر مواد پلیمری چسبیده به آسفالت بازیافتی می‌تواند تا حدی میزان جذب آب بتن را کاهش دهد. اما در مجموع میزان تخلخل و جذب آب سنگدانه مستهلک شده، جذب آب بتن غلتکی را افزایش می‌دهد. بطوریکه در طرح AS-10%, 20%, 30%, 40%, 50% میزان جذب آب اولیه نسبت به نمونه CONTROL به ترتیب ۱/۵۶٪، ۱/۷۵٪، ۱/۹۸٪، ۲/۳۰٪، ۲/۶۰٪ و میزان جذب آب ثانویه (۷۲ ساعت)

به ترتیب ۳/۳۳٪، ۳/۸۰٪، ۴/۱۲٪، ۴/۵۰٪، ۵/۰۲٪ افزایش یافته است. جدول و شکل شماره ۱۲ و ۷ میزان جذب آب اولیه و ثانویه نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه می‌کند. آبا به منظور سنجش کیفیت بتن در آزمایش جذب آب، بتن‌های با جذب آب ۵٪ و بالاتر را در رده ضعیف، ۳٪ تا ۵٪ را در رده متوسط و کمتر از ۳٪ را در رده خوب دسته‌بندی کرده است. همچنین در این آیین‌نامه برای پایایی بتن در محیط‌های خورنده مانند سازه‌های بتنی در تماس با دریا، حداکثر میزان جذب آب را در قسمت‌هایی که در ناحیه جزر و مد و ناحیه پاشش فوق‌العاده شدید و سازه‌های نگهدارنده‌های آب و تصفیه خانه فاضلاب ۳/۵٪ تعیین کرده است. همچنین مقررات ملی ساختمان ویرایش سال ۱۳۹۹ میزان جذب آب اولیه نمونه ۲۸ روزه برای مناطق XCD1، XCS1 کمتر از ۳/۵٪، برای مناطق XCS2، XCD2، XCD3 کمتر از ۳٪، برای مناطق XCD4، XCS3 کمتر از ۲/۵٪ و برای مناطق XCS4 کمتر از ۲٪ توصیه کرده است.

جدول ۱۲ نتایج آزمایش جذب آب اولیه و ثانویه

Table 12 Results of primary and secondary water absorption tests

نام طرح	وزن نمونه خشک	وزن نمونه اشباع		درصد جذب آب		نتیجه بر اساس آبا	نتیجه بر اساس معیار ارزیابی میحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۹
		۳۰ دقیقه	۷۲ ساعت	۳۰ دقیقه	۷۲ ساعت		
		گرم	گرم	٪	٪		
CONTROL	۲۳۴۳	۲۳۷۷	۲۴۱۴	۱/۴۳	۲/۹۴	خوب	مناسب در تمام شرایط محیطی
AS-10%	۲۵۲۲	۲۵۶۲	۲۶۰۹	۱/۵۶	۳/۳۳	متوسط	مناسب در تمام شرایط محیطی
AS-20%	۲۳۰۴	۲۳۴۵	۲۳۹۵	۱/۷۵	۳/۸۰	متوسط	مناسب در تمام شرایط محیطی
AS-30%	۲۲۸۲	۲۳۲۸	۲۳۸۰	۱/۹۸	۴/۱۲	متوسط	مناسب در تمام شرایط محیطی
AS-40%	۲۲۵۰	۲۳۰۳	۲۳۵۶	۲/۳۰	۴/۵۰	متوسط	مناسب در تمام شرایط محیطی به استثنای شرایط XCS4
AS-50%	۲۲۱۲	۲۲۷۱	۲۳۲۹	۲/۶۰	۵/۰۲	ضعیف	مناسب در تمام شرایط محیطی به استثنای شرایط XCS4، XCS3، XCD4

شرایط محیطی XCD1: دارای رطوبت متوسط

شرایط محیطی XCS1: بتن در معرض نمک‌های کم موجود در هوا و دور از دریا

شرایط محیطی XCS2: بتن غرقاب یا درون خاک خیس یا خاک مرطوب

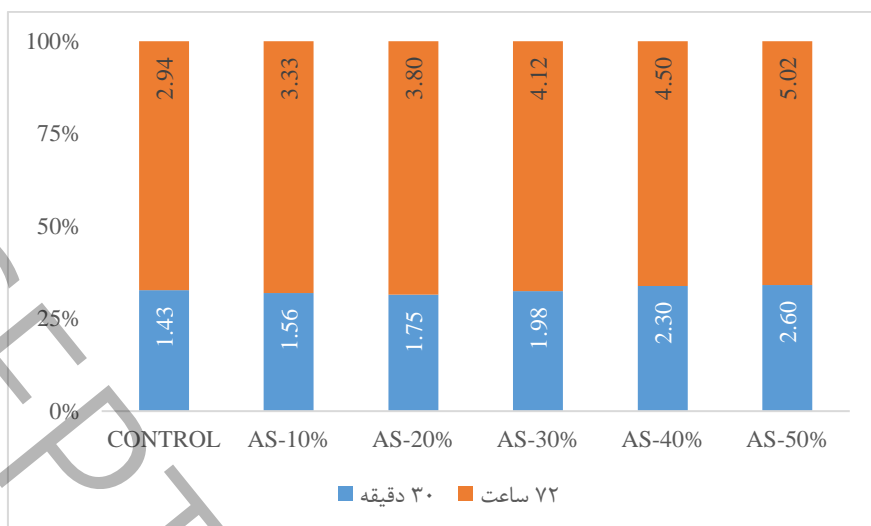
شرایط محیطی XCD2: مرطوب به ندرت خشک

شرایط محیطی XCD3: بتن در تماس مستقیم با خاک دارای یون کلراید

شرایط محیطی XCS3: بتن در معرض نمک زیاد موجود در هوا و بدون تماس مستقیم با آب دریا یا پاشش

شرایط محیطی XCD4: بتن در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن

شرایط محیطی XCS4: نواحی در معرض پاشش جزر و مد دریا



شکل ۷ نتایج آزمایش جذب آب اولیه و ثانویه

Figure 7 Results of primary and secondary water absorption tests

۳-۵ - دوام در برابر شرایط اسیدی

شدت آسیب و خاصیت باران‌های اسیدی در مناطق مختلف و با توجه به آلودگی محیط می‌تواند متغیر باشد. باران اسیدی بدلیل داشتن سولفوریک و نیتریک، به خمیره سیمان بتن آسیب می‌زند و باعث نفوذ در ناحیه مویینه بتن شود و به تدریج خوردگی و زوال ایجاد می‌کند. برای ارزیابی مقاومت و دوام بتن در برابر حملات اسیدی از استاندارد ASTM-C267 تبعیت شد. بدین ترتیب نمونه‌های ۲۸ روزه، به مدت ۳۰ و ۶۰ روز در حوضچه حاوی محلول اسید سولفوریک رقیق شده با آب قرار گرفتند. با توجه به آنکه میزان اسیدی بودن باران اسیدی در اقلیم‌های مختلف متفاوت است نمی‌توان pH مشخصی را برای شبیه‌سازی آن تعیین نمود. زیرا میزان pH باران اسیدی به عوامل مختلفی بستگی دارد. اما با جمع‌بندی مستندات مختلف می‌توان میزان pH آن را بین حداقل ۲/۵ تا حداکثر ۵/۵ در نظر گرفت. همچنین در سایر تحقیقات پیشین میزان pH حوضچه اسیدی را برای نگهداری بتن بین ۲/۵ تا ۶/۵ در نظر گرفته‌اند [۱۶، ۱۱]. در این تحقیق میزان pH حوضچه اسیدی، حداقل در نظر گرفته شد تا میزان تاب‌آوری و دوام بتن در سخت‌ترین شرایط ممکن بررسی شود. بدین منظور میزان pH حوضچه محلول اسیدی حدود ۲/۵ تنظیم شد. برای تنظیم pH محلول اسیدی در طول مدت قرارگیری نمونه‌ها، از pH متر استفاده شد و به صورت هفتگی کنترل لازم صورت پذیرفت. همچنین برای تفسیر نتایج دوام بتن در برابر شرایط اسیدی از شاخص‌های میزان کاهش وزن، میزان کاهش مقاومت فشاری و تغییرات ظاهری بتن استفاده شده است. شکل شماره ۸ تصویر اسید کلریدریک و pH متر برای شبیه‌سازی باران اسیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۸ تصویر اسید کلریدریک و pH متر برای شبیه‌سازی باران اسید

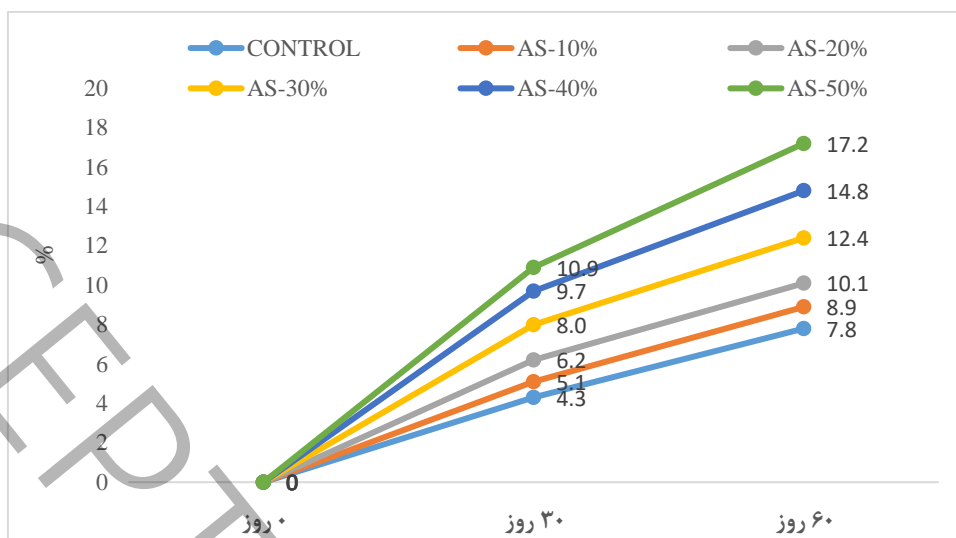
Figure 8: Image of hydrochloric acid and pH meter for simulating acid rain

نتایج بدست آمده از میزان کاهش مقاومت نمونه‌ها به شرح جدول و شکل شماره ۱۳ و ۹ می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید که بدلیل تخلخل بالاتر درشت‌دانه بازیافتی، اسید به منافذ مویینه بتن انتقال یافته و علاوه بر توقف واکنش هیدراتاسیون سیمان، موجب خوردگی و زوال سیمان و بتن شده است. بنابراین با افزودن هر چه بیشتر آسفالت بازیافتی در بتن میزان کاهش مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. بطوریکه مقاومت فشاری طرح AS-10%, 20%, 30%, 40%, 50% نسبت به نمونه CONTROL پس از ۳۰ روز قرارگیری در حوضچه اسید، به ترتیب ۵/۱٪، ۶/۲٪، ۸/۰٪، ۹/۷٪، ۱۰/۹٪ و پس از ۶۰ روز قرارگیری در حوضچه اسید به ترتیب ۸/۹٪، ۱۰/۱٪، ۱۲/۴٪، ۱۴/۸٪، ۱۷/۲٪ کاهش یافته است.

جدول ۱۳ مقایسه میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در اثر نفوذ اسید

Table 13 Comparison of the reduction in compressive strength of samples due to acid penetration

مقاومت فشاری نمونه پس از قرارگیری در حوضچه اسید					نام طرح
۶۰ روز	۳۰ روز	۶۰ روز	۳۰ روز	مقاومت اولیه	
%	%	مگاپاسکال	مگاپاسکال	مگاپاسکال	
-۷/۸	-۴/۳	۳۱/۷	۳۲/۸	۳۴/۲	CONTROL
-۸/۹	-۵/۱	۳۰/۱	۳۱/۲	۳۲/۸	AS-10%
-۱۰/۱	-۶/۲	۲۷/۸	۲۸/۸	۳۰/۶	AS-20%
-۱۲/۴	-۸/۰	۲۵/۶	۲۶/۷	۲۸/۸	AS-30%
-۱۴/۸	-۹/۷	۲۳/۰	۲۴/۱	۲۶/۴	AS-40%
-۱۷/۲	-۱۰/۹	۲۱/۲	۲۲/۴	۲۴/۸	AS-50%



شکل ۹ مقایسه میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در اثر نفوذ اسید

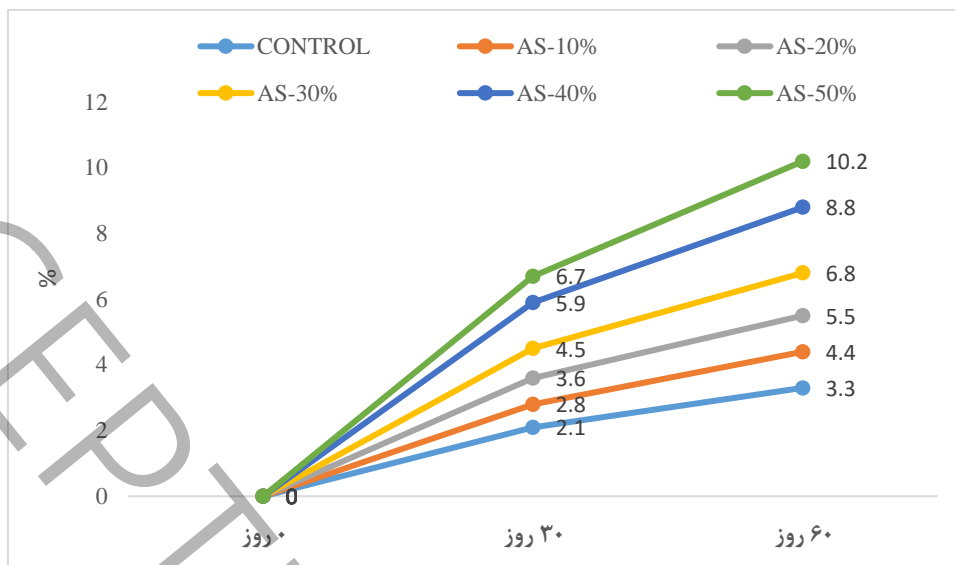
Figure 9 Comparison of the reduction in compressive strength of samples due to acid penetration

نتایج بدست آمده از میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از قرارگیری در حوضچه اسید، خوردگی و زوال خمیره سیمان را در اثر تهاجم اسید در بتن تایید می‌کند. بطوریکه با افزایش مقادیر حجمی آسفالت بازیافتی در بتن میزان کاهش وزن نمونه در اثر حمله اسید افزایش یافته است. میزان کاهش وزن طرح AS-10%, 20%, 30%, 40%, 50% نسبت به نمونه CONTROL پس از ۳۰ روز قرارگیری در حوضچه اسید به ترتیب ۲/۸٪، ۳/۶٪، ۴/۵٪، ۵/۹٪، ۶/۷٪ و پس از ۶۰ روز قرارگیری در حوضچه اسید به ترتیب ۴/۴٪، ۵/۴٪، ۶/۸٪، ۸/۸٪، ۱۰/۲٪ کاهش یافته است.

جدول ۱۴ مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌ها در اثر نفوذ اسید

Table 14 Comparison of weight loss of samples due to acid penetration

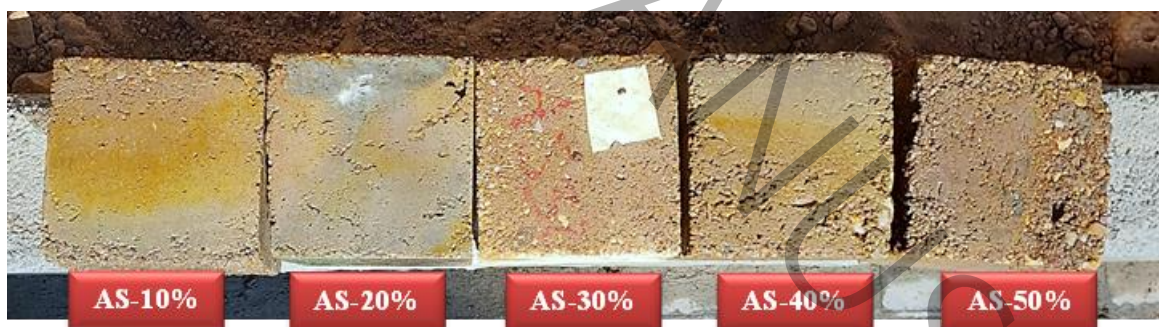
وزن نمونه پس از قرارگیری در حوضچه اسید					نام طرح
روز ۶۰	روز ۳۰	روز ۶۰	روز ۳۰	وزن اولیه	
%	%	گرم	گرم	گرم	
-۳/۳	-۲/۱	۷۳۱۲	۷۳۹۸	۷۵۵۳	CONTROL
-۴/۴	-۲/۸	۷۱۶۷	۷۲۷۹	۷۴۸۲	AS-10%
-۵/۴	-۳/۶	۷۰۳۸	۷۱۶۷	۷۴۲۵	AS-20%
-۶/۸	-۴/۵	۶۹۰۵	۷۰۵۷	۷۳۷۴	AS-30%
-۸/۸	-۵/۹	۶۷۲۵	۶۹۰۹	۷۳۱۷	AS-40%
-۱۰/۲	-۶/۷	۶۵۸۸	۶۸۰۴	۷۲۶۰	AS-50%



شکل ۱۰ مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌ها در اثر نفوذ اسید

Figure 10 Comparison of weight loss of samples due to acid penetration

شکل شماره ۱۱ وضعیت ظاهری نمونه‌ها پس از خارج شدن از حوضچه اسیدی را نشان می‌دهد. تغییر شکل ظاهری و تغییر رنگ سطح بتن از جمله عوارضی است که در اثر قرارگیری بتن در حوضچه اسیدی ایجاد شده. با مقایسه وضعیت ظاهری نمونه‌ها با یکدیگر مشهود است که هرچه میزان حجم آسفالت بازیافتی در بتن افزایش یابد، تخلخل بیشتر شده و اسید بیشتری به منافذ بتن رسوب کرده که باعث افزایش خرابی آن گردیده. البته لازم به ذکر است که استفاده از میکروسیلیس قطعاً توانسته میزان دوام بتن در برابر شرایط اسیدی بهبود دهد. در غیر اینصورت میزان خرابی و زوال بتن غلتکی ساخته شده با آسفالت بازیافتی بیشتر از نتایج بدست آمده بود.



شکل ۱۱ مقایسه شکل ظاهری نمونه‌ها پس از خروج از حوضچه اسید (پس از ۶۰ روز)

Figure 11 Comparison of the appearance of the samples after leaving the acid bath (after 60 days)

۴-۵ - دوام در برابر چرخ دُوب-یخبندان

دوام نمونه‌های مورد مطالعه در برابر چرخه دُوب-یخبندان از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا بخش زیادی از کشور ایران در مناطق سردسیری قرار دارد و ممکن است استفاده از این طرح جهت احداث روسازی در مناطق سردسیر مشکلات عدیده‌ای را بوجود آورد. از طرفی اثرات یخبندان، مانند انقباض ناشی از دُوب-یخبندان و نیز کاهش باربری بستر روسازی در این چرخه متناوب دارای اهمیت است. بنابراین ضرورت دارد تا بر اساس پیشینه دمای حداقل و حداکثر محلی در محدوده راهسازی، تاثیرات و عوامل مخرب ناشی از آن در نظر گرفته شود. در این تحقیق جهت سنجش میزان دوام نمونه‌ها در برابر چرخه دُوب-یخبندان طبق استاندارد ASTM-

C666-B پس از سپری شدن ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه متوالی انجام شد. شکل شماره ۱۲ فریزر مورد استفاده در این تحقیق و شکست نمونه‌های حاوی آسفالت پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-یخبندان را نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهند که عمده شکست‌ها در ناحیه دانه‌های آسفالت رخ داده است، که بیانگر ضعف و کم‌تحمیلی دانه‌های آسفالتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی است.



شکل ۱۲ تصاویر مربوط به انجام آزمایش ذوب-یخبندان و شکست نمونه‌های پس از قرارگیری در چرخه‌های متوالی

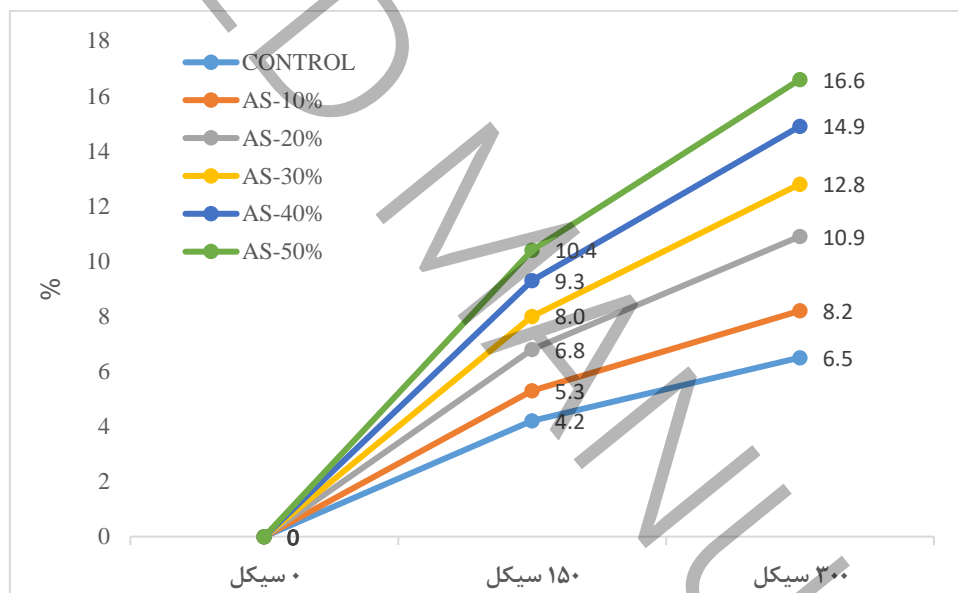
Figure 12 Images of the freeze-thaw test and failure of samples after exposure to consecutive cycles

طبق نتایج بدست آمده مشخص شد که بدلیل میزان جذب آب بالای درشت‌دانه آسفالت بازیافتی، میزان انبساط و انقباض ناشی از چرخه ذوب و انجماد در بتن افزایش می‌یابد و در نتیجه نمونه‌ها دچار ترک و زوال زودرس می‌گردند. بنابراین با افزودن هر چه بیشتر آسفالت بازیافتی در بتن میزان کاهش وزن و کاهش مقاومت بتن افزایش می‌یابد. بطوریکه میزان کاهش مقاومت فشاری طرح AS-10% 20%، 30%، 40%، 50% نسبت به نمونه CONTROL پس از ۱۵۰ چرخه ذوب-یخبندان به ترتیب ۴/۲٪، ۵/۳٪، ۶/۱۸٪، ۸/۱۰٪، ۹/۳٪، ۱۰/۴٪ و پس از ۳۰۰ چرخه ذوب-یخبندان به ترتیب ۶/۵٪، ۸/۲٪، ۱۰/۹٪، ۱۲/۸٪، ۱۴/۹٪، ۱۶/۶٪ می‌باشد. همچنین میزان کاهش وزن طرح AS-10%، 20%، 30%، 40%، 50% نسبت به نمونه CONTROL پس از ۱۵۰ چرخه ذوب-یخبندان به ترتیب ۱/۹٪، ۲/۶٪، ۳/۸٪، ۴/۷٪، ۵/۷٪، ۶/۹٪ و پس از ۳۰۰ چرخه ذوب-یخبندان به ترتیب ۳/۲٪، ۴/۴٪، ۶/۵٪، ۸/۱۰٪، ۹/۷٪، ۱۱/۷٪ می‌باشد. طبق توصیه استاندارد ASTM-C666-B معیار رد یا پذیرش دوام بتن در برابر چرخه ذوب-یخبندان نیز حداکثر کاهش وزن بتن بیش از ۵٪ یا حداکثر افت مقاومت فشاری بتن بیش از ۱۰٪ مردود اعلام شده و در این صورت زوال و خرابی بتن اعلام می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اذعان داشت که استفاده از مقادیر بیشتر از ۱۰٪ آسفالت بازیافتی در بتن غلتکی منجر به خرابی و زوال بتن خواهد شد.

جدول ۱۵ میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-یخبندان

Table 15: Reduction in compressive strength of samples after exposure to freeze-thaw cycles

مقاومت فشاری پس از ذوب-یخبندان					نام طرح
۳۰۰ سیکل	۱۵۰ سیکل	۳۰۰ سیکل	۱۵۰ سیکل	مقاومت اولیه	
%	%	مگاپاسکال	مگاپاسکال	مگاپاسکال	
-۶/۵	-۴/۲	۳۲/۱	۳۲/۸	۳۴/۲	CONTROL
-۸/۲	-۵/۳	۳۰/۳	۳۱/۱	۳۲/۸	AS-10%
-۱۰/۹	-۶/۸	۲۷/۶	۲۸/۷	۳۰/۶	AS-20%
-۱۲/۸	-۸/۰	۲۵/۵	۲۶/۷	۲۸/۸	AS-30%
-۱۴/۹	-۹/۳	۲۳/۰	۲۴/۲	۲۶/۴	AS-40%
-۱۶/۶	-۱۰/۴	۲۱/۳	۲۲/۵	۲۴/۸	AS-50%



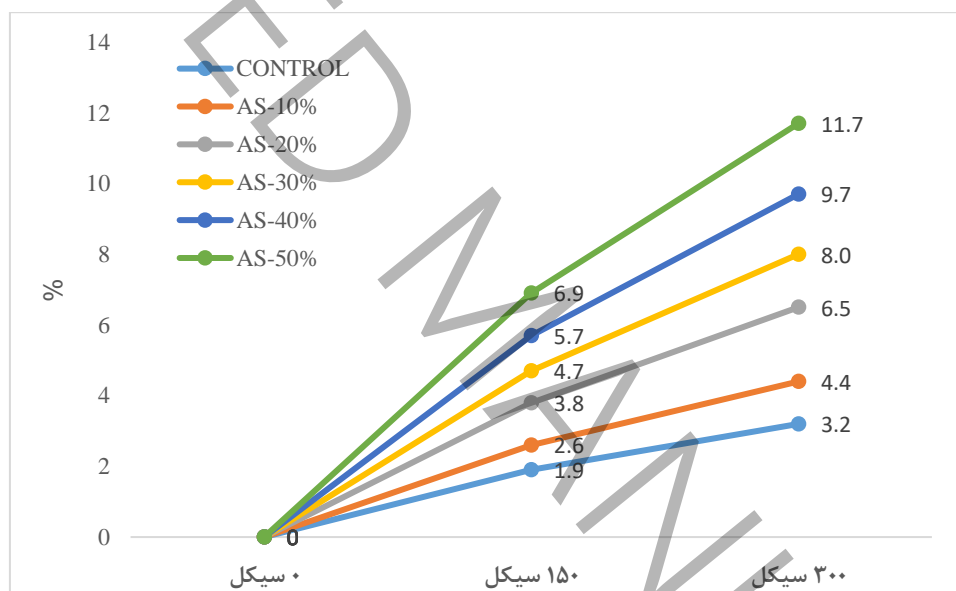
شکل ۱۳ میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-یخبندان

Figure 13: The rate of decrease in compressive strength of samples after exposure to freeze-thaw cycles

جدول ۱۶ میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-یخبندان

Table 16: Weight loss of samples after exposure to freeze-thaw cycles

وزن پس از ذوب-یخبندان					نام طرح
۳۰۰ سیکل	۱۵۰ سیکل	۳۰۰ سیکل	۱۵۰ سیکل	وزن اولیه	
%	%	گرم	گرم	گرم	
-۳/۲	-۱/۹	۷۳۱۹	۷۴۱۲	۷۵۵۳	CONTROL
-۴/۴	-۲/۶	۷۱۶۷	۷۲۹۳	۷۴۸۲	AS-10%
-۶/۵	-۳/۸	۶۹۷۲	۷۱۵۳	۷۴۲۵	AS-20%
-۸/۰	-۴/۷	۶۸۲۸	۷۰۴۳	۷۳۷۴	AS-30%
-۹/۷	-۵/۷	۶۶۷۰	۶۹۲۲	۷۳۱۷	AS-40%
-۱۱/۷	-۶/۹	۶۴۹۹	۶۷۹۱	۷۲۶۰	AS-50%



شکل ۱۴ میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-یخبندان

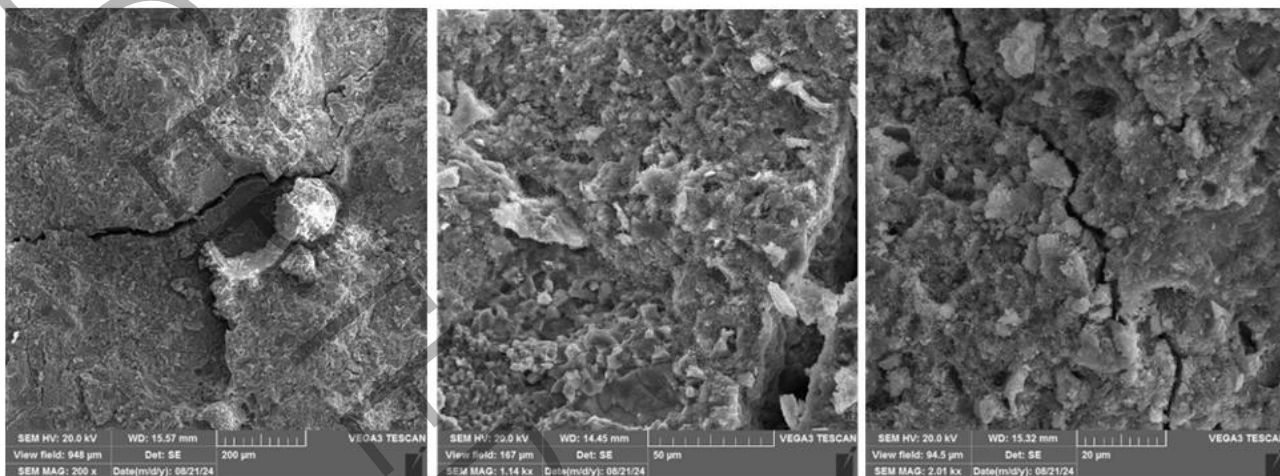
Figure 14 Weight loss of samples after exposure to freeze-thaw cycles

۵-۵ - تصاویر الکترونی روبشی

تصویر الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ساختار میکروسکوپی مواد بکار می‌رود و امکان مشاهده جزئیات سطحی و داخلی را فراهم می‌آورد. در این تصاویر توزیع ذرات، تشکیل محصولات هیدراتاسیون، وجود ترک‌ها و فازهای مختلف، تعیین می‌گردد. این تصاویر کمک می‌کنند تا مکانیزم‌های تخریب و تأثیر افزودنی‌ها و مواد جایگزین به‌طور دقیق مشاهده و بررسی شوند.

شکل "الف" نشان می‌دهد که ساختار بتن در سطح میکروسکوپی نسبتاً متراکم است. ذرات میکروسیلیس به خوبی در بین ذرات سیمان و ضایعات آسفالت پراکنده شده‌اند. همچنین میکروسیلیس در پر کردن این ترک نقش داشته و از تخریب گسترده‌تر بتن جلوگیری کرده است. شکل "ب" به وضوح تشکیل محصولات هیدراتاسیون سیمان را نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) به عنوان ماده اصلی چسبیده و ایجاد استحکام، به‌صورت یکنواخت تشکیل شده است. همچنین کریستال‌های اترینگایت نیز به صورت ساختارهای سوزنی شکل دیده می‌شوند که نمایانگر روند کامل هیدراتاسیون است. بنابراین حضور ذرات آسفالت ضایعاتی به عنوان ناخالصی در ماتریس بتن موانعی ایجاد نکرده و تأثیری منفی بر فرایند هیدراتاسیون نداشته است. بنابراین دلیل عمده کاهش مقاومت و

دوام این بتن، در اثر عدم چسبندگی مناسب سنگدانه آسفالت بازیافتی به خمیره سیمان و مقاومت کمتر آن نسبت به سنگدانه طبیعی می‌باشد. شکل "ج" ترک ایجاد شده روی سنگدانه آسفالت بازیافتی را نشان می‌دهد. این ضعف بدلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از فرآیند بازیافت آسفالت و فرسایش قبلی آن می‌باشد که منجر به کاهش استحکام و یکپارچگی ساختاری این دانه‌ها می‌شود. این ترک‌ها نه تنها مقاومت سنگدانه را کاهش می‌دهد بلکه باعث تمرکز تنش در نقاط ضعف و شکستگی زودرس بتن شود.



شکل ج

شکل ب

شکل الف

شکل ۱۵ تصاویر الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی مختلف

Figure 15 Scanning electron microscope (SEM) images at different magnifications

۶-۵ - آنالیز حساسیت

به منظور بررسی میزان تاثیر هر یک از اجزای طرح اختلاط بر خواص بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی، از تحلیل حساسیت استفاده شد. بتن غلتکی سیستمی چند متغیره است که در آن عملکرد نهایی بتن تحت تاثیر همزمان اجزای مختلفی نظیر سیمان، مواد افزودنی، سنگدانه‌ها و آب قرار دارد. بنابراین شناسایی میزان اثرگذاری هر یک از این متغیرها بر پارامترهای عملکردی بتن، نقش مهمی در درک رفتار مخلوط و همچنین بهینه‌سازی طرح اختلاط ایفا می‌کند. تحلیل حساسیت این امکان را فراهم می‌کند که سهم نسبی هر متغیر ورودی در تغییرات پارامترهای خروجی به صورت کمی ارزیابی شود. در میان روش‌های مختلف تحلیل حساسیت، در این تحقیق از ضریب همبستگی پیرسون^۱ استفاده شده است. لازم به ذکر است که ضریب همبستگی پیرسون تنها روابط خطی بین متغیرها را نشان می‌دهد و ممکن است روابط غیرخطی موجود در رفتار بتن را به طور کامل منعکس نکند. با این حال، این روش می‌تواند دید اولیه مناسبی از میزان تاثیر نسبی هر یک از اجزای طرح اختلاط بر پارامترهای عملکردی بتن ارائه دهد. ضریب همبستگی پیرسون میزان وابستگی خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند و مقدار آن در بازه +۱ تا -۱ قرار دارد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین دو متغیر و مقادیر منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس بین آن‌ها هستند. همچنین هرچه مقدار قدرمطلق این ضریب به ۱ نزدیک‌تر باشد، شدت همبستگی بیشتر خواهد بود و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر همبستگی ضعیف یا ناچیز هستند [۲۲].

ضریب همبستگی پیرسون بین دو متغیر X و Y مطابق رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

¹ Pearson Correlation Coefficient

در این رابطه، X_i مقدار متغیر ورودی در مشاهده i و Y_i مقدار متغیر خروجی متناظر، X و Y به ترتیب میانگین متغیرهای X و Y ، و پارامتر n تعداد کل داده‌ها هستند. مقدار به دست آمده برای r شدت و جهت رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد [۲۲]. محاسبات با استفاده از نرم‌افزار Excel و بر اساس کل داده‌های موجود انجام شد. در این فرآیند، ضریب همبستگی برای هر یک از اجزای مخلوط نسبت به هر یک از شاخص‌های عملکردی محاسبه گردید و در قالب یک ماتریس همبستگی ارائه شد. این ماتریس امکان مقایسه میزان تاثیر هر یک از اجزای مخلوط بر خواص مختلف بتن خودتراکم را فراهم می‌کند. مقادیر مثبت بیانگر افزایش پارامتر عملکردی با افزایش مقدار ماده مورد نظر و مقادیر منفی بیانگر کاهش آن هستند. نتایج بدست آمده به شرح جدول و شکل شماره ۱۷ و ۱۶ می‌باشد.

جدول ۱۷ خلاصه معادلات رگرسیونی و پارامترهای آماری استخراج شده برای مدل‌سازی رفتار بتن

Table 17 Summary of regression equations and extracted statistical parameters for modeling concrete behavior

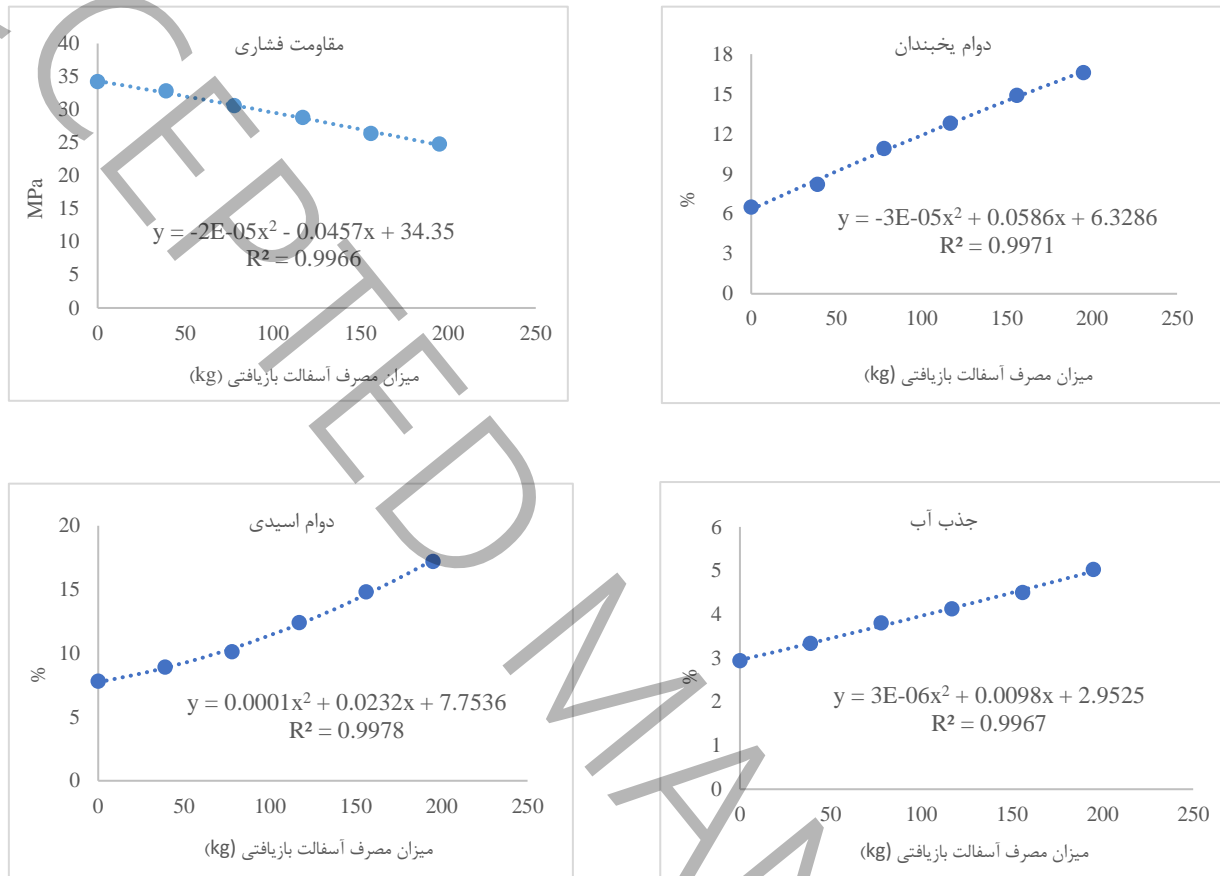
پارامتر مورد بررسی	نوع مدل	معادله استخراج شده	دقت مدل (R^2)	رفتار کلی
مقاومت فشاری	رابطه جمله‌ای درجه ۲	$y = -2E-0.5x^2 - 0.0457x + 34.35$	0.9966	کاهش مقاومت فشاری با آسفالت بازیافتی
جذب آب		$y = 3E-0.6x^2 + 0.0098x + 2.9525$	0.9967	افزایش یکنواخت جذب آب با آسفالت بازیافتی
دوام در برابر اسید		$y = 0.0001x^2 + 0.0232x + 7.7536$	0.9978	افزایش آفت وزن در اسید
دوام در برابر چرخه ذوب-یخبندان		$y = -3E-0.5x^2 + 0.0586x + 6.3286$	0.9971	کاهش دوام یخبندان با افزایش آسفالت بازیافتی

روند مقاومت فشاری نشان داد که با افزایش آسفالت بازیافتی، کاهش مقاومت به صورت تدریجی اتفاق افتاد و شدت این کاهش در مقدارهای بالاتر واضح‌تر بود. در بتن غلتکی که تراکم مکانیکی نقش اصلی را ایفا می‌کند، حضور سنگدانه‌های پوشیده از قیر مانع از ایجاد پیوند کامل بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه شد و یک ناحیه میان مرحله‌ای متخلخل به وجود آورد. این ناحیه به دلیل ضعف پیوند و وجود حفرات ریز، هنگام اعمال تنش به نقطه تمرکز تنش تبدیل شد و عملکرد بتن را تضعیف کرد.

تغییرات جذب آب روند کاملاً معکوس مقاومت فشاری را نشان داد و افزایش مقدار آسفالت بازیافتی باعث افزایش جذب آب شد. این رفتار ناشی از آن است که لایه قیری سنگدانه‌های آسفالتی با خمیر سیمان پیوستگی کامل ایجاد نمی‌کند و چنین ساختاری در بتن غلتکی موجب شکل‌گیری حفرات ریز و مسیرهای موئینه پیوسته می‌شود. در نتیجه میزان نفوذپذیری بتن افزایش پیدا کرد و جذب آب در نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد بیشتر شد. این روند بیانگر کاهش مقاومت بتن در برابر نفوذ آب و انتقال یون‌های مهاجم است. رفتار بتن در محیط اسیدی نیز تحت تاثیر افزایش آسفالت بازیافتی قرار گرفت و میزان آفت وزن در چنین محیطی رشد محسوسی داشت. قیر موجود در سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی مقاومت پایدار در برابر محیط‌های اسیدی ندارد و در تماس با محلول اسیدی دچار سست شدن می‌شود. سست شدن لایه قیری همراه با نفوذ آسان یون‌های خورنده از طریق ناحیه تماس ضعیف، روند تخریب را تسریع کرد. به همین دلیل آفت وزن نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت که نشان دهنده حساسیت بیشتر بتن غلتکی دارای این نوع سنگدانه‌ها در محیط‌های تهاجمی است.

نتایج آزمون ذوب-یخبندان نیز افزایش چشمگیر تخریب را با افزایش مقدار آسفالت بازیافتی نشان داد. وجود تخلخل بیشتر و ضعف پیوند در مرز سنگدانه و خمیر سیمان موجب شد بتن توان کافی برای مقابله با فشار هیدرولیکی ناشی از انجماد آب را نداشته باشد. در نتیجه ترک‌زایی و پوسته‌پوسته شدن بتن در چرخه‌های ذوب-یخبندان با سهولت بیشتری رخ داد. همین مسئله باعث شد میزان آسیب ناشی از ذوب-یخبندان نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کند.

در جمع‌بندی کلی، افزایش آسفالت بازیافتی اثر منفی پیوسته و قابل پیش‌بینی بر بتن غلتکی داشت و این اثر در تمام شاخص‌ها با سازوکارهای ریزساختاری مانند ضعف پیوند در ناحیه تماس و افزایش تخلخل قابل توجیه بود. داده‌های درصدی نشان دادند که کاهش عملکرد در مقدارهای پایین محدود است، اما در مقدارهای بالاتر شدت افت خواص مکانیکی و دوام افزایش می‌یابد.



شکل ۱۶ نمودارهای تحلیل حساسیت و برازش منحنی بر روی داده‌های آزمایشگاهی
Figure 16 Sensitivity analysis and curve fitting plots on laboratory data

۷-۵ - شاخص عملکرد

در این تحقیق، انتخاب طرح اختلاط بهینه مستلزم گزینش گزینه‌ای از میان چند طرح آزمایش شده است که بتواند مجموعه‌ای از معیارهای عملکردی را به طور همزمان در محدوده مطلوب قرار دهد. از آنجا که معیارهای مورد بررسی شامل شاخص‌های مختلف دوام و عملکرد بتن حاوی سنگدانه آسفالتی بازیافتی هستند، بهینه‌سازی تک معیاره قادر به ارائه ارزیابی جامع از عملکرد طرح‌ها نبوده و استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره این امکان را فراهم می‌کنند که معیارهایی با ماهیت، واحد اندازه‌گیری و دامنه تغییرات متفاوت در قالب یک شاخص ترکیبی بدون بعد ادغام شده و مقایسه همزمان طرح‌های اختلاط امکان‌پذیر گردد. با توجه به اینکه نتایج آزمایش‌ها به صورت گسسته و برای تعداد محدودی از طرح‌های اختلاط به دست آمده است، مسئله حاضر در دسته مسائل "انتخاب از میان گزینه‌ها" قرار می‌گیرد. بنابراین استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر امتیازدهی نسبت به روش‌های بهینه‌سازی پیوسته مناسب‌تر ارزیابی می‌شود [۲۳].

در این تحقیق از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر مجموع وزنی (WSM)^۱ برای محاسبه شاخص عملکرد کلی هر طرح اختلاط استفاده شده است. در این روش، معیارهای مختلف پس از انجام فرآیند نرمال‌سازی و اعمال ضرایب وزنی، در قالب یک شاخص ترکیبی بدون بعد تجمیع شده و مبنای رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط قرار می‌گیرند. از آنجا که معیارهای عملکرد دارای مقیاس‌ها و واحدهای متفاوت هستند، پیش از ترکیب آن‌ها فرآیند نرمال‌سازی انجام می‌شود تا مقادیر به بازه‌ای بدون بعد تبدیل شده و قابلیت مقایسه آن‌ها فراهم گردد.

برای معیارهایی که مقدار بیشتر آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهتر است، نرمال‌سازی مطابق رابطه (۲) انجام شد [۲۴]:

$$N_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{\min}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (2)$$

برای معیارهایی که مقدار کمتر آن‌ها بیانگر عملکرد مطلوب‌تر است، رابطه نرمال‌سازی به صورت معکوس و مطابق رابطه شماره ۳ تعریف شد [۲۴]:

$$N_{ij} = \frac{X_j^{\max} - X_{ij}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (3)$$

X_{ij} مقدار معیار i برای طرح j است.

$X_{j\max}$ و $X_{j\min}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار معیار i در میان تمام طرح‌ها هستند.

X_{ji} مقدار نرمال شده معیار i برای طرح j است.

به‌کارگیری این رابطه موجب می‌شود که جهت اثر تمام معیارها یکسان شده و مقدار بیشتر همواره نشان‌دهنده عملکرد بهتر باشد. این جهت‌سازی شرط لازم برای ترکیب معتبر معیارها در مرحله بعدی محسوب می‌شود. از آنجا که معیارهای عملکرد دارای درجه اهمیت یکسانی نیستند، برای هر معیار یک وزن اختصاص داده شده است. وزن‌ها بیانگر سهم نسبی هر معیار در تصمیم‌گیری نهایی هستند و مجموع آن‌ها برابر با واحد در نظر گرفته شده است که از طریق رابطه شماره ۴ محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (4)$$

w_j وزن معیار j است.

وزن‌دهی موجب می‌شود معیارهای کلیدی اثر بیشتری در نتیجه نهایی داشته باشند. پس از نرمال‌سازی معیارها و تعیین وزن‌ها، شاخص عملکرد کلی هر طرح به عنوان معیار نهایی بهینه‌یابی محاسبه شده است. این شاخص به صورت مجموع وزن‌دار معیارهای نرمال شده تعریف می‌شود که از طریق رابطه شماره ۵ محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$PI_i = \sum_{j=1}^m W_j N_{ij} \quad (5)$$

که در آن:

PI_i شاخص عملکرد طرح i است.

m تعداد کل معیارهای در نظر گرفته شده است.

¹ Weighted Sum Method

در روش مجموع وزنی، ضرایب وزنی متفاوتی برای معیارهای عملکردی در نظر گرفته شد تا اهمیت نسبی هر معیار در ارزیابی نهایی منعکس گردد. با توجه به نقش اساسی دوام در عملکرد بلند مدت بتن، برای شاخص‌های دوام وزن ۰/۰۷۷ در نظر گرفته شد. همچنین در بخش مصالح مصرفی، به منظور تاکید بر ملاحظات زیست محیطی و استفاده مجدد از مواد بازیافتی، برای کاهش مصرف شن طبیعی و افزایش استفاده از سنگدانه آسفالتی بازیافتی وزن ۰/۲۳۱ اختصاص داده شد. این رویکرد وزن‌دهی با هدف ایجاد تعادل میان عملکرد مکانیکی، دوام و ملاحظات پایداری زیست‌محیطی در انتخاب طرح اختلاط بهینه اتخاذ گردید.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول شماره ۱۸، شاخص عملکرد دوام برای طرح‌های مختلف بتن حاوی سنگدانه آسفالتی بازیافتی در بازه ۰/۴۶۲ تا ۰/۵۵۱ تغییر می‌کند. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این شاخص مربوط به طرح AS-10 با مقدار ۰/۵۵۱ است که بیانگر بهترین عملکرد کلی در میان طرح‌های مورد بررسی می‌باشد. مقدار شاخص در نمونه شاهد برابر ۰/۵۲۸ به دست آمده است که اندکی کمتر از طرح AS-10 بوده و نشان می‌دهد استفاده از مقدار محدود سنگدانه آسفالتی می‌تواند بدون کاهش عملکرد، حتی به بهبود نسبی شاخص دوام منجر شود. این رفتار را می‌توان به ماهیت نسبتاً آب‌گریز سطح ذرات آسفالتی و کاهش نسبی نفوذ آب در ماتریس بتن نسبت داد که در مقادیر کم جایگزینی، اثر مثبتی بر برخی شاخص‌های دوام دارد.

با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه آسفالتی، مقدار شاخص عملکرد دوام به تدریج کاهش می‌یابد. بطوریکه برای طرح‌های AS-20 تا AS-50 به ترتیب مقادیر ۰/۵۳۴، ۰/۵۱۶، ۰/۴۸۱ و ۰/۴۶۲ به دست آمده است. این روند کاهشی نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد سنگدانه آسفالتی می‌تواند موجب تضعیف عملکرد کلی بتن شود.

در مجموع، نتایج شاخص عملکرد دوام نشان می‌دهد که استفاده از نسبت‌های پایین سنگدانه آسفالتی، به ویژه حدود ۱۰٪ جایگزینی، می‌تواند عملکرد مناسبی از نظر دوام و خواص کلی بتن فراهم کند. در حالیکه افزایش بیشتر نسبت‌های جایگزینی باعث افت تدریجی عملکرد می‌شود. بر این اساس، محدوده ۱۰ تا ۲۰٪ سنگدانه آسفالتی بازیافتی را می‌توان به عنوان محدوده مناسب جایگزینی از نظر شاخص عملکرد دوام در نظر گرفت.

جدول ۱۸ مقادیر شاخص عملکرد دوام (DPI) برای طرح‌های اختلاط مختلف بتن حاوی سنگدانه آسفالتی بازیافتی

Table 18 Durability Performance Index (DPI) values for different mix designs of concrete containing recycled asphalt aggregate

DPI	نام
۰/۵۳۸	CONTROL
۰/۵۵۱	AS-10%
۰/۵۳۴	AS-20%
۰/۵۱۶	AS-30%
۰/۴۸۱	AS-40%
۰/۴۶۲	AS-50%

۶- بحث و جمع‌بندی

در این تحقیق رفتار بتن غلتکی حاوی سنگدانه آسفالتی بازیافتی در قالب مجموعه‌ای از شاخص‌های مکانیکی و دوام مورد بررسی قرار گرفت و با تکیه بر نتایج آزمایشگاهی، تحلیل ریزساختار، مدل‌سازی رگرسیونی و محاسبه شاخص عملکرد، تصویر جامعی از تاثیر مقدار جایگزینی سنگدانه آسفالتی ارائه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش تدریجی سنگدانه آسفالتی در محدوده ۱۰٪ تا ۵۰٪ موجب تغییرات قابل توجهی در ساختار، رفتار و عملکرد بتن غلتکی گردید و این تغییرات در تمام شاخص‌های بررسی شده روند مشخص و قابل پیش‌بینی داشت. نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی اختلافات رفتاری مشخصی را نشان دادند که بیانگر حساسیت بتن غلتکی نسبت به ماهیت سنگدانه و کیفیت پیوند در ناحیه انتقالی است.

نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که مقاومت فشاری با افزایش مقدار سنگدانه آسفالتی کاهش یافت و این کاهش در مقادیر بالاتر شدت بیشتری پیدا کرد. ساختار سطحی پوشیده از قیر در سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی مانع از ایجاد پیوند مناسب با خمیر سیمان شد و این ضعف پیوند سبب شد ناحیه انتقالی میان سنگدانه و خمیر سیمان به نقطه‌ای مستعد تمرکز تنش و ایجاد ترک تبدیل شود. تحلیل ریزساختار با تصاویر SEM این مسئله را تایید کرد و نشان داد که با افزایش مقدار آسفالت بازیافتی، میزان ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها در بافت بتن افزایش می‌یابد و در طرح AS-50% ترک‌ها حتی در سطح خود سنگدانه آسفالتی مشاهده شد. این امر نشان داد که علاوه بر ضعف پیوند، مقاومت ذاتی سنگدانه‌های آسفالتی نیز نسبت به سنگدانه طبیعی کمتر است و در برابر تنش‌های وارده رفتار ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد.

نتایج جذب آب اولیه و نهایی بیان کرد که نفوذپذیری بتن با افزایش مقدار سنگدانه آسفالتی بیشتر می‌شود و طرح AS-50% با مقدار جذب آب ۰.۵٪ براساس معیارهای آیین‌نامه آبا در رده ضعیف طبقه‌بندی شد. عدم پیوستگی مناسب بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه آسفالتی باعث ایجاد مسیرهای موئینه پیوسته در ساختار بتن گردید و این مسیرها امکان انتقال آب و یون‌های مهاجم را تسهیل کردند. ارزیابی دوام بتن در محیط اسیدی نیز نشان داد که افزایش مقدار آسفالت بازیافتی باعث تشدید فرآیند سست‌شدگی لایه قیری و تسهیل نفوذ محلول اسیدی گردید و افت وزن نمونه‌ها روند افزایشی پیدا کرد. در آزمون چرخه‌های ذوب-یخبندان نیز روند تخریب با افزایش مقدار سنگدانه آسفالتی شدت بیشتری یافت و طرح AS-50% با کاهش وزن ۱۱/۷٪ و کاهش مقاومت فشاری ۱۶/۶٪ معیارهای دوام را نقض کرد. این نتایج نشان داد که بتن حاوی مقادیر بالاتر آسفالت بازیافتی در برابر فشارهای ناشی از انجماد و ذوب آب عملکرد مناسبی ندارد و در محیط‌های سردسیر دچار پوسته‌شدگی و ترک‌زایی زودهنگام می‌شود.

تحلیل رگرسیونی انجام شده بر مبنای روابط درجه دو نشان داد که تغییرات مقاومت فشاری، جذب آب، دوام اسیدی و دوام یخبندان با میزان آسفالت بازیافتی روند منظم و قابل مدل‌سازی دارد. ضرایب تعیین بالاتر از ۰/۹۹۶ صحت مدل‌ها را تایید کرد و نشان داد که مقدار آسفالت بازیافتی کنترل‌کننده اصلی تغییرات خواص بتن غلتکی است. نتایج مدل‌سازی سازگار با یافته‌های تجربی بود و نشان داد که با افزایش مقدار آسفالت بازیافتی، مقاومت فشاری کاهش و جذب آب و شاخص‌های تخریب حاصل از محیط اسیدی و یخبندان افزایش می‌یابد. این رفتار با ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های سطحی سنگدانه آسفالتی همخوانی داشت و قابل تبیین با افزایش تخلخل و ضعف پیوند در ناحیه انتقالی بود.

نتایج شاخص عملکرد دوام نشان داد که طرح AS-10% با مقدار ۰/۵۵۱ بهترین عملکرد کلی را در میان طرح‌های ارزیابی شده دارد و حتی نسبت به نمونه شاهد نیز عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. این نتیجه بیان کرد که استفاده از مقادیر محدود آسفالت بازیافتی نه تنها عملکرد بتن را کاهش نمی‌دهد، بلکه با توجه به ماهیت آب‌گریز سطح سنگدانه‌های آسفالتی، می‌تواند در مقادیر پایین نقش مثبتی بر برخی شاخص‌های دوام داشته باشد. با این حال، افزایش مقدار آسفالت بازیافتی به بیش از ۲۰٪ باعث کاهش تدریجی شاخص عملکرد شد و طرح AS-50% با مقدار ۰/۴۶۲ پایین‌ترین عملکرد را ارائه داد. این یافته‌ها نشان داد که استفاده از مقادیر کم آسفالت بازیافتی قابل قبول است، اما افزایش بیش از حد آن سبب افت محسوس مقاومت و دوام می‌شود.

مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین نشان داد که یافته‌های حاضر با نتایج گزارش شده در تحقیقات Amouzadeh Omrani، Karimi Goghari و Soltani، و دیگران سازگاری دارد [۲۶، ۲۵]. در این تحقیقات نیز گزارش شده است که جایگزینی سنگدانه آسفالتی موجب کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری می‌شود و اثرات منفی آن در مقادیر بالا قابل چشم‌پوشی نیست. همچنین مطالعات پیشین تاکید داشتند که استفاده از میکروسیلیس می‌تواند بخشی از ضعف‌های پیوندی در بتن حاوی مصالح بازیافتی را جبران کند، اما این جبران در مقادیر بالای جایگزینی پاسخگو نیست، که این موضوع در نتایج حاضر نیز مشاهده شد [۱۴-۱۱].

بر اساس نتایج به دست آمده، استفاده از آسفالت بازیافتی در مقادیر ۱۰٪ تا ۲۰٪ حجمی در بتن غلتکی توصیه می‌شود تا ضمن صرفه‌جویی در مصرف مصالح طبیعی، عملکرد مکانیکی و دوام بتن حفظ گردد. در کاربردهای کم‌اهمیت یا در مناطق با شرایط محیطی معتدل یا گرم، مقادیر بالاتر از ۲۰٪ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اما در نواحی سردسیر یا محیط‌های اسیدی، استفاده از آسفالت بازیافتی در مقادیر بالاتر از ۱۰٪ مناسب نیست و باید از آن اجتناب کرد، چرا که نتایج آزمایش‌های یخبندان و مقاومت در محیط اسیدی نشان‌دهنده کاهش قابل توجه دوام است. علاوه بر این، به‌کارگیری مواد اصلاح‌کننده پیوند مانند لاتکس، نانو ذرات، یا اصلاح سطح سنگدانه‌های آسفالتی و ترکیب آن‌ها با سنگدانه‌های مقاوم‌تر می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد و دوام بتن‌های حاوی آسفالت

بازیافتی باشد. در نهایت، این نوع بتن بیشتر در کاربردهای راه‌های کم‌تردد، لایه‌های سبک روسازی، شانه‌راه‌ها و محوطه‌سازی در مناطق معتدل و غیرسردسیر قابل توصیه است. در مقابل، در نواحی با چرخه‌های مکرر یخبندان، محیط‌های صنعتی اسیدی، یا در روسازی‌های پرتردد، توصیه می‌شود مقدار آسفالت بازیافتی بیش از ۱۰٪ به کار گرفته نشود. بنابراین، نتایج این تحقیق بیشتر قابل تعمیم در مناطق معتدل و کاربری‌های کم‌ترافیک هستند.

۷- نتیجه‌گیری

برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که با افزایش درصد سنگدانه آسفالتی بازیافتی از ۱۰٪ تا ۵۰٪ روند مقاومت بتن غلتکی به‌طور پیوسته کاهش یافت که این موضوع به ضعف پیوند بین خمیر سیمان و سطح قیری سنگدانه‌ها در ناحیه انتقالی نسبت داده می‌شود.
- ۲- استفاده از سنگدانه آسفالتی موجب تغییر رفتار شکست در بتن غلتکی شد و در نمونه‌های دارای درصدهای بالاتر، تمرکز ترک‌ها در ناحیه انتقالی و حتی در سطح سنگدانه‌های آسفالتی مشاهده گردید که نشان دهنده مقاومت کمتر این سنگدانه‌ها نسبت به سنگدانه طبیعی است.
- ۳- نتایج آزمایش جذب آب نشان داد که با افزایش مقدار سنگدانه آسفالتی، میزان نفوذپذیری بتن افزایش یافت و نمونه AS-50% با مقدار جذب آب ۵٪ نسبت به نمونه شاهد بیشترین افزایش را نشان داد و در طبقه بتن با کیفیت ضعیف قرار گرفت.
- ۴- نتایج آزمون دوام در محیط اسیدی نشان داد که افزایش درصد سنگدانه آسفالتی موجب افزایش افت وزن نمونه‌ها شد و این رفتار ناشی از افزایش تخلخل و نفوذپذیری در ساختار بتن و همچنین سست شدن لایه قیری در محیط اسیدی است.
- ۵- نتایج آزمون چرخه‌های ذوب-یخبندان نشان داد که افزایش درصد آسفالت بازیافتی باعث افزایش میزان تخریب بتن گردید به‌طوری‌که نمونه AS-50% با کاهش وزن ۱۱/۷٪ و افت مقاومت فشاری ۱۶/۶٪ بیشترین آسیب را در میان نمونه‌ها تجربه کرد.
- ۶- تحلیل رگرسیونی نتایج نشان داد که تغییرات مقاومت فشاری، جذب آب و شاخص‌های دوام نسبت به درصد سنگدانه آسفالتی از روابط درجه دو با ضریب تعیین بالاتر از ۰/۹۹ پیروی می‌کند که بیانگر وابستگی قوی خواص بتن به مقدار این ماده بازیافتی است.
- ۷- نتایج تحلیل ریزساختاری نشان داد که با افزایش مقدار سنگدانه آسفالتی، میزان ناپیوستگی، حفرات و ترک‌های ریز در ساختار بتن افزایش می‌یابد و این موضوع نقش مهمی در کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری دارد.
- ۸- محاسبه شاخص عملکرد دوام نشان داد که طرح AS-10% با مقدار ۰/۵۵۱ بهترین عملکرد کلی را در میان طرح‌های بررسی شده داشت و عملکرد آن نسبت به نمونه شاهد با مقدار ۰/۵۳۸ اندکی بهبود یافته است.
- ۹- نتایج شاخص عملکرد نشان داد که با افزایش درصد سنگدانه آسفالتی از ۱۰٪ به ۵۰٪ مقدار شاخص عملکرد از ۰/۵۵۱ به ۰/۴۶۲ کاهش یافت که بیانگر افت تدریجی عملکرد کلی بتن در مقادیر بالاتر جایگزینی است.
- ۱۰- نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده محدود از سنگدانه آسفالتی بازیافتی می‌تواند بدون کاهش قابل توجه عملکرد بتن غلتکی انجام شود و در عین حال به کاهش مصرف سنگدانه طبیعی و مدیریت پسماندهای عمرانی کمک کند.
- ۱۱- بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیل شاخص عملکرد، محدوده ۱۰٪ تا ۲۰٪ جایگزینی سنگدانه آسفالتی به‌عنوان محدوده مناسب برای استفاده در بتن غلتکی روسازی پیشنهاد می‌شود.

سیاسگزاری

با تشکر و قدردانی از جناب آقای مهندس خلیل شرفی و سرکار خانم دکتر لیلا شهریاری، عضو هیئت علمی محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز جهت تلاش و زحمات بی‌شائبه‌ای که در جهت ثمربخش بودن نتایج این تحقیق مبذول داشتند.

- [1] Golafshani, S., & Ghalenoei, M. (2023). Green concrete: Use of environmentally friendly materials for sustainable development. In 3rd International Conference on New Findings in Civil Engineering, Architecture, and Building Industry of Iran.
- [2] Goldoost Rezaei, M., & Taravirdizadeh. (2021). Investigation of advantages and disadvantages of green and recycled concrete. In 14th International Congress on Civil Engineering, Tehran, Iran.
- [3] Ghadim Takmeh Dash, F., Sadeghi, A. M., & Afshin, H. (2022). Investigation of some durability properties of concrete pavements containing rubber powder. Scientific and Research Journal of Azerbaijan University, Tabriz, Iran.
- [4] Esmaeili, J., Andaleibi, K., & Kasaei, J. (2020). Investigating the effect of adding recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. 10th International Congress on Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz, Iran.
- [5] Adresi, F., Ghanbari, N., & Omid, D. (2020). Investigation of the effect of mixture type and coarse texture on the skid resistance of roller compacted concrete pavement. Civil Infrastructure Research, 7(1), 111-129.
- [6] Zargar, M., & Shariatmadar. (2022). Evaluation of the effect of aggregate gradation on Vebe time and bulk density of roller compacted concrete pavement. 1st National Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management, Sharif University of Technology.
- [7] Ameri, M., Mansourian, A., & Shaker, A. (2021). Determining suitable amount of fine and coarse slag combination based on mechanical characteristics of asphalt mixtures using response surface methodology. Transportation Infrastructure Engineering, 7(3), 21-36.
- [8] Amouzadeh Omrani, M., Hasannezhad, A., & Shahbazi, V. (2022). Possibility of utilizing reclaimed asphalt pavement and steel slag as partial replacement in roller compacted concrete pavements. Concrete Materials and Structures, 7(1), 5-22. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2022.336813.1263>
- [9] Divandari, H., & Bashkoul, Y. (2021). Determination of optimum amount of reclaimed asphalt and microsilica in roller compacted concrete pavement. Jaddeh, 4(19), 155-169. <https://sid.ir/paper/1052561/fa>
- [10] Ameli, A., Parvareshkaran, E., & Hashemi, S. A. H. (2020). Investigation of four-point bending test results of RCC beams containing crumb rubber and recycled asphalt. Transportation Research Journal, 16(2), 165-188. <https://sid.ir/paper/83890/fa>
- [11] Biglari, M., Asgharzadeh, S. M., & Kavooosi, A. (2019). Investigation of factors affecting adherence between RCC pavement layer and sand-asphalt stress-absorbing interlayer. Transportation Engineering, 9(Special Issue), 89-104. <https://sid.ir/paper/223991/fa>
- [12] Divandari, H., & Bashkoul, Y. (2021). Evaluation of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in roller compacted concrete pavement (RCC). 1st International Conference on New Advances in Civil Engineering, Amol, Iran. <https://civilica.com/doc/727023>
- [13] Ghasemzadeh Mousavinezhad, S., Shadmani, T., & Tahmooressi. (2021). Mechanism of SBR latex effect on mechanical strength, permeability, and microstructure of concrete containing asphalt waste. Modares Civil Engineering, 17(6), 159-170.
- [14] Soltani, Arzoo-Mandi, Haj-Mehdi, & Yaghoubi. (2020). Properties of concrete containing recycled fine asphalt aggregate and silica fume. Experimental Research in Civil Engineering, 3(Autumn and Winter), 129-142.
- [15] Karimi Goghari, M., Hassani, A., Ahmadi, A., & Arab Ameri, H. (2021). Laboratory feasibility of using recycled asphalt as aggregate replacement in roller compacted concrete pavement mixes. Transportation Engineering, 3(1), 69-79. <https://sid.ir/paper/223884/fa>
- [16] Planning and Strategic Supervision Deputy of the President. (2009). Guide for the design and execution of RCCP in road pavements (Publication No. 354).
- [17] Bagheri Zanganeh, H. (2022). Comparison of RCMT and electrical resistance methods for rapid assessment of concrete resistance to chloride ion penetration. Modares Civil Engineering, 12(3), 103-112.
- [18] Ameri, M., Shekarchizadeh, M., & Shahabi Shahmiri, H. (2021). Effect of Isfahan steel converter slag as aggregate replacement on RCC road pavement. 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- [19] Ahmadi, S. E., Shah Hosseini, V., & Saeed Kia. (2020). Requirements for country pavements using RCCP concrete. Journal of Supervision and Strategic Planning, 56(3).

- [20] Iranian Concrete Code (ABAA). (2023). Office of Technical Affairs and Standards Compilation, Management and Planning Organization, Publication No. 120, 2nd Revision.
- [21] Regulations No. 723. (2016). Guide for the design of mass concrete gravity dams. Planning and Budget Organization.
- [22] Regulations No. 120. (2004). Iranian Concrete Code. Management and Planning Organization.
- [23] Iranian National Building Code, Part 9. (2020). Housing and Urban Development Research Center of Iran.
- [24] Ministry of Roads & Urban Development News Portal. (2023). <http://news.mrud.ir/>
- [25] Statistical Yearbook of Iranian Road Maintenance and Transportation Organization. (2024).
- [26] Farsnov Cement Co. (2023). <https://www.farsnov.com>
- [27] Iranian National Standard No. 14830. (2012). Guide for design and implementation of roller compacted concrete (RCC) for national pavements.
- [28] Iranian National Standard No. 448. (2014). Resistance of coarse and fine aggregates against abrasion and impact in Los Angeles machine.