

## تعیین میزان بهینه خرده آسفالت و میکروسیلیس در ساخت روسازی بتن غلتکی

مقاله علمی - پژوهشی

حسن دیواندری<sup>\*</sup>، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران  
یاسر بشکول، دانش آموخته کارشناسی ارشد، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [divandari@iauns.ac.ir](mailto:divandari@iauns.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

صفحه ۱۶۹-۱۵۵

### چکیده

یکی از مسائل و مشکلاتی که امروزه در صنعت ساخت و ساز جهان مشاهده می‌گردد، حجم عظیم نخاله‌های ساختمانی به ویژه آسفالت‌های حاصل از بازسازی روسازی راه‌ها می‌باشد. خرده‌های آسفالت، از جمله مواد زائدی هستند که اثرات نامطلوب گسترده آن بر محیط زیست، به اثبات رسیده است. پژوهش‌های انجام شده در خصوص این مصالح، راهکارهای گوناگونی برای استفاده مجدد از آن‌ها در صنعت، ارائه نموده‌اند. یکی از کاربردهای عملی این مصالح، استفاده از آن در ساخت بتن است. از طرفی مصالح مذکور، حاصل از عملیات بازسازی روسازی جاده‌ها بوده و از این‌رو مطلوب است که با هدف کاهش هزینه‌های حمل، مجدداً در ساخت مخلوط‌های متداول روسازی راه، استفاده گردد. تحقیق حاضر که به روش آزمایشگاهی-توصیفی انجام شده است به ارزیابی عملکرد روسازی بتن غلتکی ساخته شده از خرده آسفالت به همراه میکروسیلیس در ساخت روسازی بتن غلتکی می‌پردازد. نتایج آزمایش‌های عملکردی نشان داد که حالت بهینه مخلوط، در مقدار خرده آسفالت حدود چهل و پنج درصد و میکروسیلیس حدود شش و نیم درصد، حاصل می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ضمن کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و هزینه‌های اجرایی پروژه‌ها، از خرده آسفالت به همراه افزودنی میکروسیلیس در ساخت روسازی مسیرهای با ترافیک پایین و راه‌های روستایی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مصالح خرده آسفالت، روسازی بتن غلتکی، میکروسیلیس، مقاومت فشاری

### ۱- مقدمه

دانمارک که حدود ۹۵ درصد از نخاله‌های ساختمانی آن بازیافت می‌شوند، (Mak et al., 2020) پتانسیل بالقوه‌ای برای سرمایه گذاری در بخش بازیافت دارد. خرده آسفالت‌های بازیافتی<sup>۱</sup> که پسماند حاصل از تراش رویه‌های آسفالتی است، بخش بسیار بزرگی از این مصالح زاید را تشکیل می‌دهد. به طوری که در بسیاری از کشورهای جهان سالانه صدها تن از این مواد دور ریز می‌شوند که به روش‌های مختلف می‌توان از آن‌ها مجدداً استفاده نمود. استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی به حفظ منابع تجدید ناپذیر و جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی و تسریع در روند ساخت راه‌ها کمک بسزایی می‌کند. مصالح خرده آسفالت بازیافتی متشکل از مصالح سنگی درشتدانه، ریزدانه،

یکی از مهمترین مسائلی که در حال حاضر توجه محققین محیط زیست را به خود جلب کرده، مقوله بازیافت است. بازیافت به معنای استفاده مجدد از موادی است که پیشتر در صنعت ساخت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر استفاده از مواد بازیافتی در ساخت انواع بتن و آسفالت، مورد توجه محققان، مهندسان و دست‌اندرکاران محیط زیست قرار گرفته است. (Ameli et al., 2020; Pérez et al., 2019; Nguyen et al., 2020; Debbarma et al., 2020) بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که نخاله‌های ساختمانی حدود ۵۰ درصد حجم کل مواد ضایعاتی را در دنیا تشکیل می‌دهند. ایران در مقایسه با کشورهای پیشرفته از جمله

فیلر و قیر هستند. یکی از موارد استفاده از خرده آسفالت بازیافتی، ساخت لایه‌های روسازی راه است. این راهکار در اکثر کشورهای جهان اجرایی شده و یا در حال بررسی جهت اجرا است. با توجه به کمبود مصالح مناسب راهسازی که اغلب مصالح رودخانه‌ای و یا سنگ شکسته حاصل از استخراج معادن هستند و نیز هزینه زیاد آماده سازی و حمل این مصالح، در مورد بهره‌گیری از مصالح بازیافتی در اکثر کشورهای توسعه یافته نظیر ایالات متحده، آلمان، هلند، بلژیک و نروژ تحقیقات زیادی صورت پذیرفته و نیز استانداردهای ویژه‌ای برای استفاده از این مصالح تدوین شده است. (Shatarat et al., 2019) یکی از انواع روسازی‌های نوین، روسازی بتن غلتکی<sup>۲</sup> است. این نوع روسازی به صورت تازه با بتن معمولی تفاوت‌های بسیاری دارد. این نوع بتن بسیار سفت‌تر از بتن معمولی است و به آب کمتری نیاز دارد. کارآیی آن کمتر از بتن معمولی است و پس از پخش باید قابلیت تحمل وزن غلتک را جهت تراکم داشته باشد. مزایای متعدد این نوع روسازی، موجب شده است که تحقیقات گسترده‌ای در خصوص عملکرد آن انجام گردد. (Pourabdollah and Dabiri, 2017; Fardad, 2018; Mohammed and Adamu, 2018)

## ۲- پیشینه تحقیق

هر ساله حجم زیادی از مواد ضایعاتی از صنعت، مصارف خانگی، ساخت و تخریب ساختمان‌ها و تراشیدن آسفالت ایجاد می‌شود که انباشت آنها عاملی مهمی در آلودگی محیط زیست است. از طرف دیگر هر ساله حجم زیادی از منابع طبیعی به عنوان مصالح اولیه برای ساخت پروژه‌های عمرانی مختلف، مصرف می‌شود. استفاده مجدد از ضایعات عنوان شده در فرآیند ساخت، تامین کننده دو هدف قابل توجه است. اول اینکه استفاده از این مواد با این شرط که حداقل کیفیت مورد نیاز محصول تامین شود، کمک قابل توجهی در حفظ منابع طبیعی اولیه و به طبع آن افزایش صرفه اقتصادی است. دوم اینکه استفاده از این مواد ضایعاتی، اثر تخریبی رها سازی آنها در محیط زیست را به شدت کاهش خواهد داد.

بتن غلتکی، بتنی است با اسلامپ صفر که در ساخت سد و روسازی صلب راه، بکار می‌رود. از جمله مزایای عمده روسازی بتن غلتکی که سبب برتری آن نسبت به روسازی‌های آسفالتی و بتنی معمولی شده است، مواردی چون اجرای سریع و آسان، هزینه‌های اجرایی کم، مصرف کمتر سیمان و مقاومت زیاد آن

در شرایط آب و هوایی سرد و گرم، عنوان شده است. (Aghaeipour and Madhkhani, 2019) خاصیت اصلی بتن مذکور این است که در زمان اجرا، امکان عبور غلتک از روی آن فراهم است. به طوری که پس از عبور غلتک، بتن سخت و متراکم شده‌ای حاصل می‌گردد. (Code No. 354, 2009) در کانادا، آمریکا و بعضی از کشورهای اروپایی، از این نوع بتن برای ساخت رویه راه‌ها و رویه‌های صنعتی با ترافیک بسیار سنگین در شرایط آب و هوایی نامساعد همچون سرما و یخبندان شدید استفاده می‌شود. تاکنون بسیاری از کشورها استفاده از بتن غلتکی را برای ساخت روسازی راه‌های نظامی، نواحی صنعتی، فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها، جاده‌ها و ... آغاز کرده اند. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری جدید، سبب کاهش هزینه‌های اجرایی تا میزان ۲۵ درصد می‌شود. (Zolghadri et al., 2017) استفاده از بتن غلتکی در راهسازی تاریخچه چندان طولانی ندارد و شاید بتوان گفت که برای اولین بار، سابقه استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی به قرن بیستم توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا در ساخت کف‌های صنعتی باز می‌گردد. پس از آن، این گروه از بتن غلتکی برای ساخت بانده پرواز در فرودگاه واشنگتن در سال ۱۹۴۲ استفاده کردند. از دیگر موارد کاربرد بتن غلتکی در مقیاس بزرگ، ساخت یک محوطه صنعتی در ونکور کانادا در سال ۱۹۷۶ بوده است. (Karimi et al., 2011) بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌ها باعث بهبود عملکرد بتن غلتکی می‌شود. در دو تحقیقی که از الیاف فولاد صنعتی، پلی پروپیلن و دوده سیلیسی در ساخت بتن غلتکی استفاده شد، مشخص گردید که مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن حاصل، افزایش قابل توجهی یافته است. (Fardad, 2018; Madani et al., 2017) بررسی عملکرد روسازی بتن غلتکی در مناطق سردسیر نشان داد که افزودن سه درصد میکروسیلیس و دو درصد حباب ساز، بهترین کارآیی را در این نوع روسازی بوجود می‌آورد. (Pourabdollah and Dabiri, 2017) امروزه با هدف کاهش اثرات مخرب زیست محیطی انباشت زائدات ساختمانی و صنعتی، ایده استفاده از این مواد در ساخت انواع روسازی از جمله روسازی بتن غلتکی، مورد توجه محققان قرار گرفته است. (Modarres et al., 2018) با همین رویکرد، در پژوهش‌های متعددی از خرده لاستیک در ساخت بتن غلتکی استفاده شده است. بررسی نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که

#### ۴- روش پژوهش

در تحقیق حاضر، پس از انتخاب مصالح و انجام آزمایش‌های اولیه آن، دانه‌بندی مصالح انجام شد. با توجه به درصد‌های مختلف خرده‌آسفالت و میکروسیلیس مورد استفاده، بیست و دو طرح اختلاط انجام گردید. در نهایت با نسبت‌های آب به سیمان بدست آمده، نمونه‌های نهایی ساخته شد و مقاومت فشاری نمونه‌های با درصد‌های مختلف خرده آسفالت بازیافتی و درصد‌های مختلف میکروسیلیس تعیین شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

#### ۴-۱- شرح دقیق طرح پژوهش

نمونه‌های ساخته شده شامل هفت درصد مختلف خرده آسفالت، با درصد‌های (۰، ۲۵، ۳۷/۵، ۵۰، ۶۲/۵، ۷۵ و ۱۰۰) که جایگزین مصالح سنگی گردید و چهار درصد متفاوت میکروسیلیس (۰، ۴، ۸ و ۱۲ درصد) که جایگزین سیمان بودند. به منظور اطمینان از نتایج، جهت هر یک از شرایط هفت روزه و بیست و هشت روزه، سه نمونه ساخته شد. بنابراین در مجموع ۱۶۸ نمونه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

#### ۴-۱-۱- سنگدانه

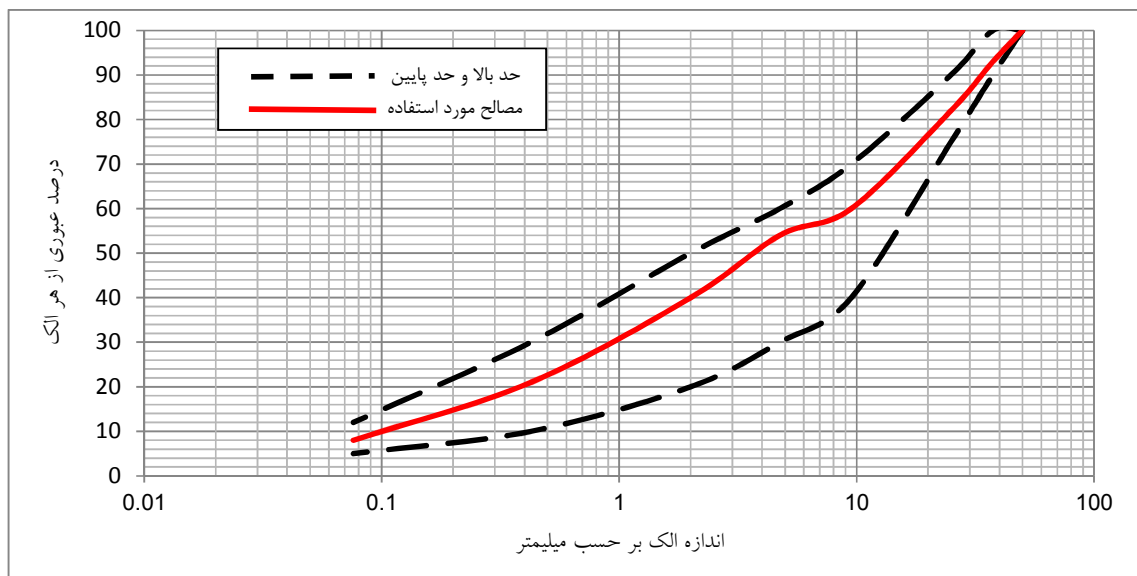
سنگدانه‌ها مطابق آیین نامه روسازی بتن غلتکی دانه‌بندی شدند. استفاده از مصالح درشت دانه‌تر سبب اقتصادی‌تر شدن طرح می‌شود. زیرا فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها کاهش یافته و خمیر سیمان کمتری مورد نیاز خواهد بود. اما به منظور دستیابی به سطحی نسبتاً صاف در روسازی راه، آیین نامه حداکثر اندازه اسمی مصالح<sup>۳</sup> مورد استفاده در ساخت روسازی بتن غلتکی را به ۱۹ میلی‌متر محدود کرده است. (Code No. 731, 2017) سنگدانه مورد استفاده در مخلوط‌های بتن غلتکی شامل هر دو اندازه ریزدانه (عبوری از الک نمره ۴) و درشت‌دانه (مانده روی الک نمره ۴) است.

در این پژوهش از مصالح ماسه شسته شکسته و شن نخودی در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. همچنین درصد سایش و شکستگی مصالح سنگی به ترتیب به میزان ۲۱ و ۸۹ درصد تعیین گردید. بدین ترتیب امکان وقوع خرابی جداشدگی در بافت سطحی روسازی نیز محدودتر می‌گردد. دانه‌بندی مورد استفاده در نمودار شکل (۱) ارایه شده است.

جایگزینی بخش ریزدانه این نوع بتن با خرده لاستیک باعث کاهش خصوصیات مکانیکی آن می‌شود. با بررسی سایر پژوهش‌ها مشخص می‌شود که اضافه کردن میکروسیلیس در این نوع مخلوط‌ها، باعث بهبود پارامترهای مکانیکی آن می‌شود. (Pourabdollah and Dabiri, 2017; Ameli et al., 2018) در پژوهش دیگری اثر استفاده از باطله‌های معدنی بر عملکرد بتن غلتکی مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق مشخص شد که هرچند سنگدانه‌های کوارتزی باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود، اما جنس سنگدانه‌ها، تأثیری بر مقاومت کششی این نوع بتن ندارد. (Fattahi et al., 2018) یکی از موادی که در این خصوص مورد توجه محققین قرار گرفته، خرده آسفالت بازیافتی است. به دلیل وجود قیر در اطراف خرده آسفالت، استفاده از این مصالح به عنوان جایگزین مصالح طبیعی بتن غلتکی می‌تواند باعث کاهش جذب آب و در نتیجه کاهش آب مورد نیاز در ساخت بتن غلتکی شود. در یک پژوهش، خرده آسفالت به عنوان بخشی از سنگدانه بتن غلتکی استفاده شد. نتایج نشان داد که قابلیت جذب انرژی در مخلوط‌هایی که فقط بخش درشتدانه آن با خرده آسفالت جایگزین شده تقریباً با مخلوط‌هایی که هر دو بخش ریزدانه و درشتدانه آن جایگزین شده، برابر است. (Modarres and Hosseini, 2015) در تحقیق دیگری که در سال ۱۳۹۷ انجام شد، مشخص گردید که مقادیر خرده آسفالت بالای ۵۰ درصد، باعث کاهش مقاومت فشاری بتن غلتکی خواهد شد. ضمناً مشخص شد که وجود مصالح بازیافتی موجب کاهش درصد آب لازم برای مخلوط و کاهش قابل توجه چگالی بتن غلتکی می‌گردد. (Ameli, Parvareh Karan and Hashemi, 2018)

#### ۳- فرضیه پژوهش

با توجه به مطالب گفته شده، استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی باعث کاهش اثرات مخرب زیست محیطی دپوی این مصالح در طبیعت می‌گردد. استفاده از مصالح مذکور در ساخت بتن غلتکی می‌تواند گامی در کاهش این اثرات در نظر گرفته شود. هر چند در مخلوط حاصل کاهش قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی بوجود می‌آید اما فرض بر این است که این کاهش با استفاده از ژل میکروسیلیس تعدیل می‌گردد. در این پژوهش سعی می‌شود مقادیر بهینه استفاده از خرده آسفالت بازیافتی و ژل میکروسیلیس جهت دستیابی به حداکثر مقاومت، تعیین گردد.



شکل ۱. دانه‌بندی مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن غلتکی در این پژوهش

تشکیل شده است که لایه نازکی از قیر سطح سنگدانه‌ها را پوشانده است. این لایه معمولاً ضخامتی بین ۶ تا ۹ میکرومتر دارد. به عبارت دیگر خرده آسفالت درشت دانه می‌تواند مجموعه‌ای از درشت دانه و ریزدانه باشد که به‌واسطه حضور قیر به هم متصل است.

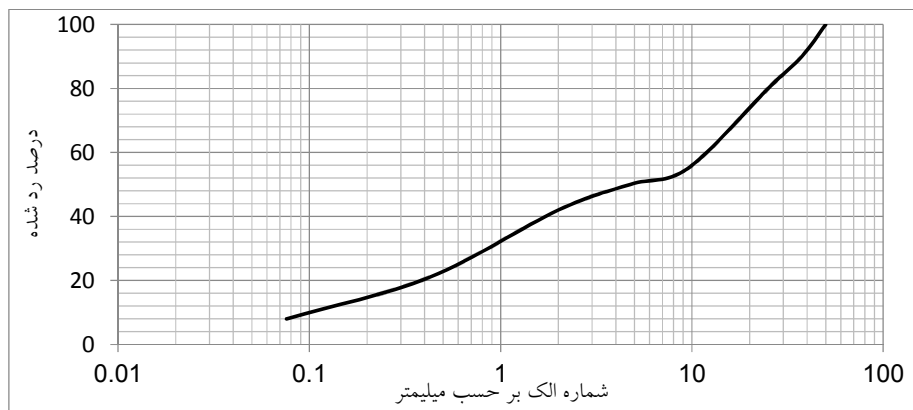
حداکثر اندازه اسمی خرده آسفالت مورد استفاده در ساخت روسازی بتن غلتکی را می‌توان همانند مصالح طبیعی به ۱۹ میلی‌متر محدود کرد. خرده آسفالت استفاده شده در این پژوهش از دیوی موجود در جاده کندوان تهیه شده است. این مصالح همانند سنگدانه‌های طبیعی مورد استفاده در ساخت بتن غلتکی (شکل ۲)، دانه‌بندی شدند.

۴-۱-۲- سیمان

در این پژوهش از سیمان تیپ II کارخانه دیلمان گیلان که مصرف ویژه آن در ساخت بتن‌هایی است که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله سولفات‌ها به آن در حد متوسط می‌باشد، استفاده شد. سیمان مورد استفاده از نظر شیمیایی ملزومات استاندارد ملی ۱۶۹۲ و از نظر فیزیکی، استانداردهای ملی شماره ۳۹۰ تا ۳۹۴ را برآورده کند.

۴-۱-۳- خرده آسفالت

خرده آسفالت از تراشیدن رویه‌های آسفالتی حاصل می‌شود. این مصالح از سنگدانه و یا مجموعه به هم چسبیده‌ای از سنگدانه



شکل ۲. دانه‌بندی خرده آسفالت مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن غلتکی در این پژوهش

#### ۴-۱-۴- ژل میکروسیلیس

کاهش ترک‌های پلاستیک و ارتقاء نسبی مقاومت‌های کششی و خمشی بتن مد نظر است، توصیه می‌گردد. ژل میکروسیلیس با مشخصات فیزیکی و شیمیایی جدول (۱)، از اختلاط آب و پودر میکروسیلیس به همراه مقادیر مشخصی افزودنی، مطابق جدول (۲) بدست می‌آید. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود بیش از ۹۳ درصد این ژل، از میکرو سیلیس تشکیل شده است.

ژل میکروسیلیس مورد نیاز جهت انجام این پژوهش (کلاس SF-250) از شرکت فرآورده‌های شیمیایی تهیه گردیده که با استانداردهای شماره‌های (ASTM C 494 & C 1202) مطابقت دارد. ژل میکروسیلیس کلاس SF-250 علاوه بر آنکه برای ساخت بتن‌های با مقاومت بالا، آب بند، نفوذ ناپذیر و پردوام و ملات‌های ویژه مورد کاربرد دارد، در بتن‌هایی که

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژل میکروسیلیس مورد استفاده در این پژوهش

حالت	دوغاب غلیظ یا زله‌ای
رنگ	خاکستری
وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۱/۲۵
استاندارد	ASTM C 494 & C 1202
یون کلر	ندارد
PH	حدود ۹
دانه‌بندی ذرات	۰/۲ تا ۰/۳ میکرون
میزان نیترات	ندارد
نقطه انجماد (درجه سانتیگراد)	صفر
بسته بندی	گالن‌های ۱۲/۴ و ۲۵ کیلوگرمی
زمان مصرف و نحوه نگهداری	تا شش ماه با درب بسته به دور از یخ زدگی
نقطه اشتعال	ندارد

جدول ۲. ترکیب افزودنی ژل میکروسیلیس مورد استفاده در این پژوهش

ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
آب	۰/۰۸	میکرو سیلیس	۹۳/۸۹	اکسید کلسیم	۰/۴۹	اکسید پتاسیم	۱/۰۱
سیلیکن	۰/۵۰	اکسید آهن	۰/۸۷	اکسید منیزیم	۰/۹۷	فسفات	۰/۱۶
کربن	۰/۳۰	اکسید آلومینوم	۱/۳۲	اکسید سدیم	۰/۳۱	تری اکسید گوگرد	۰/۱۰

#### ۴-۲- جامعه و نمونه آماری

که روش ساخت آنها در ادامه آمده است. عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد (ASTM C 171) انجام گرفت. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و برای مدت زمان مورد نیاز (۷ یا ۲۸ روز) درون حمام آب قرار گرفتند. لازم به ذکر است که زمان عمل‌آوری از زمانی که مخلوط درون حمام آب قرار می‌گیرد، محاسبه می‌شود. در جدول شماره (۴)، یک طرح از بیست و دو طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش به صورت نمونه ارائه شده است.

در این پژوهش بیست و دو طرح اختلاط با درصدهای مختلف (RAP) و میکروسیلیس استفاده شده است که در هر یک از طرح‌ها، مقدار شن و ماسه شسته شکسته، سیمان، آب، میکروسیلیس، مصالح بازیافت آسفالت، نسب آب به سیمان تعیین گردیده است. روش‌های ساخت نمونه‌های بتن غلتکی شامل دو دسته کلی تراکم با کوبه و تراکم توسط میز ویبره بودند. در این پژوهش از نمونه مکعبی با تراکم کوبه استفاده شد

جدول ۳. طرح اختلاط بتن غلتکی در این پژوهش

ردیف	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (درصد)	میکروسیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	ژل میکروسیلیس لازم (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت آب به سیمان (W/C)	سنگدانه ترکیبی (kg/m <sup>3</sup> )
۱	۴۰۵	۱۳۱	۰	۰	۰	۳۲ درصد	۱۸۶۰
۲	۳۸۸/۸	۱۳۱	۴	۱۶/۲	۱۷/۲۵	۳۲ درصد	۱۸۶۰
۳	۳۷۲/۶	۱۳۱	۸	۳۲/۴	۳۴/۵۱	۳۲ درصد	۱۸۶۰
۴	۳۵۶/۴	۱۳۱	۱۲	۴۸/۶	۵۱/۷۶	۳۲ درصد	۱۸۶۰

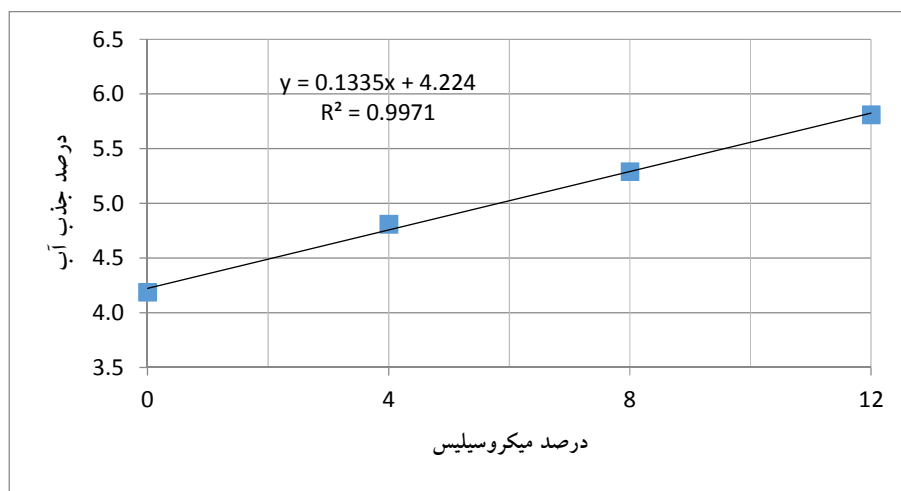
جدول ۴. طرح مورد استفاده با ۱۰۰ درصد مصالح با شن و ماسه طبیعی و ۴ درصد میکروسیلیس

طرح شماره ۱
۱۰۰ درصد مصالح شن و ماسه طبیعی
۰ درصد مصالح بازیافتی جایگزین شن و ماسه
۴ درصد میکروسیلیس
$\frac{w}{c+p} = 32\%$
$C = 388/8 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Micro Silica = 16/20 (kg/m <sup>3</sup> )
Water = 131 (kg/m <sup>3</sup> )

### ۵- نتایج حاصل از آزمون جذب آب

میکروسیلیس، افزایشی بوده است. به طور کلی، در ازای هر چهار درصد افزایش در مقدار میکروسیلیس، میزان جذب آب حدود ۰/۵ درصد افزایش یافته است.

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب در نمودار شکل (۳) قابل مشاهده است. همانطور که در این نمودار مشخص است، مقدار جذب آب در نمونه‌های حاوی ۴، ۸ و ۱۲ درصد



شکل ۳. میزان درصد جذب آب با توجه به درصدهای مختلف میکروسیلیس نمونه‌های بتن غلتکی

## ۶- یافته‌ها و نتایج پژوهش

پس از ساخت نمونه‌های بتن غلتکی با درصدهای مختلف خرده آسفالت بازیافتی، میکروسیلیس و با طرح اختلاط مشخص، آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی انجام شد که نتایج آن در ادامه ارایه می‌گردد.

## ۶-۱- نتایج مقاومت فشاری

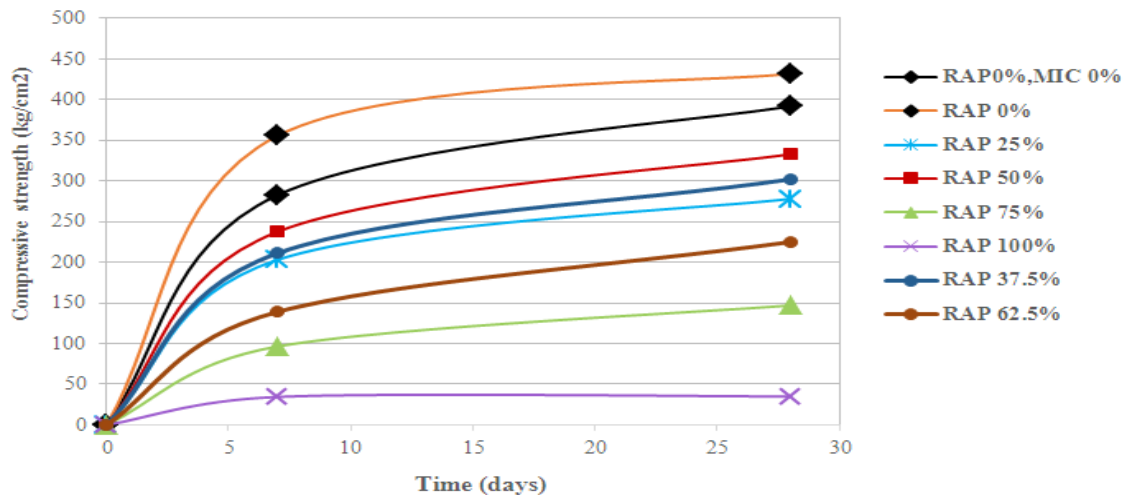
مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵×۱۵، مطابق استاندارد ASTM C1176-13 در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شده است. نتایج نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه ساخته شده مطابق جدول (۵) تعیین گردید.

جدول ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی با درصدهای مختلف آسفالت بازیافتی و میکروسیلیس

RAP 100% (kg/cm <sup>2</sup> )	RAP 75% (kg/cm <sup>2</sup> )	RAP 62.5% (kg/cm <sup>2</sup> )	RAP 50% (kg/cm <sup>2</sup> )	RAP 37.5% (kg/cm <sup>2</sup> )	RAP 25% (kg/cm <sup>2</sup> )	RAP 0% (kg/cm <sup>2</sup> )	روز	درصد میکروسیلیس
۳۴/۵	۹۵/۵	۱۳۹	۲۳۷/۵	۲۱۱	۲۰۳	۳۵۵/۵	۷	۴ درصد
۳۵	۱۴۷	۲۲۵	۳۳۳	۳۰۲	۲۷۸	۴۳۲	۲۸	
۲۴	۱۵۵/۵	۱۹۳/۵	۲۲۰	۲۱۲	۱۸۲/۵	۳۰۹/۵	۷	۸ درصد
۳۱	۲۰۷	۲۸۱	۳۴۶/۵	۳۴۱	۲۷۱/۵	۴۵۵	۲۸	
۲۱	۳۲	۸۲	۱۱۵/۵	۱۳۴/۵	۱۳۲/۵	۳۲	۷	۱۲ درصد
۲۲/۵	۱۳۱	۱۹۳	۲۶۹	۲۴۱/۵	۲۴۷/۵	۴۸۵/۵	۲۸	

خرده آسفالت و در مقدار میکروسیلیس ثابت، عموماً مقاومت کاهش می‌یابد هر چند استثناهایی نیز وجود دارد. اما در مقدار خرده آسفالت ثابت، افزایش مقدار میکروسیلیس، عموماً ابتدا باعث افزایش و سپس کاهش مقاومت خواهد شد. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، لازم است که نمودار تغییرات مقاومت در مقابل تغییرات مقدار خرده آسفالت و میکروسیلیس، مورد بررسی قرار گیرند. در نمودار شکل (۴) مقاومت فشاری نمونه‌های با مقادیر مختلف RAP و ۴ درصد میکروسیلیس نشان داده شده‌اند.

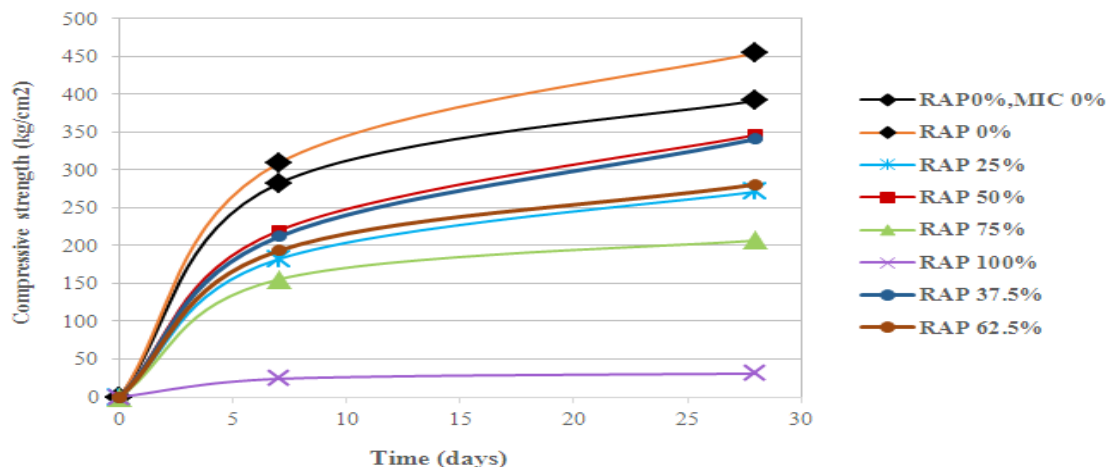
لازم به ذکر است برای نمونه‌های بدون خرده آسفالت و بدون میکروسیلیس، مقاومت هفت روزه ۲۸۲/۵ و مقاومت بیست و هشت روزه، ۳۹۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، تعیین شد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که مقاومت فشاری هفت روزه و بیست و هشت روزه نمونه‌های با درصدهای مختلف RAP و درصدهای مختلف میکروسیلیس، به ترتیب بین ۲۱-۳۵۵/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ۲۲/۵-۴۸۵/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، متغیر است. نکته قابل توجه این است که با افزایش مقدار



شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه شاهد و نمونه‌های با مقادیر مختلف (RAP) و ۴ درصد میکروسیلیس

اختصاص داده است. در ادامه و به منظور بررسی وضعیت تغییر در مقاومت سایر نمونه‌ها، در شکل (۵) مقاومت فشاری نمونه‌های با مقادیر مختلف RAP و هشت درصد میکروسیلیس را به بررسی می‌پردازیم.

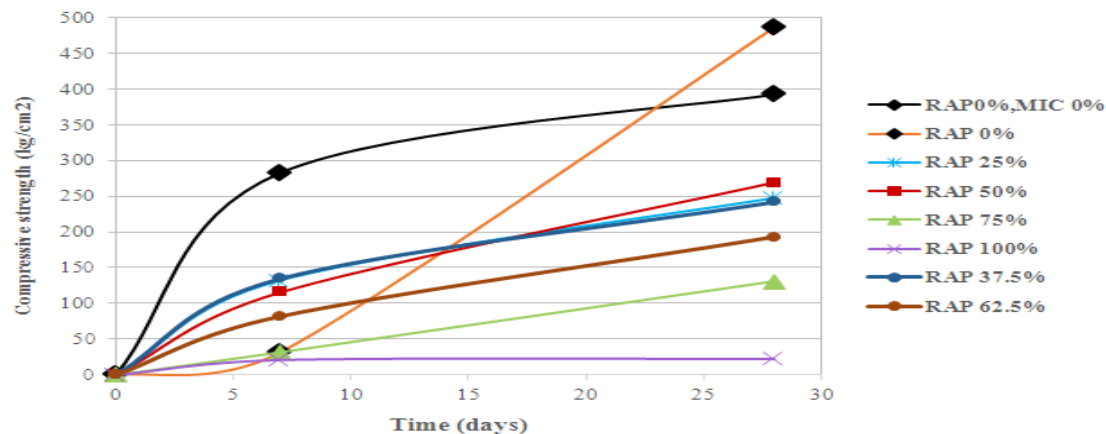
باتوجه به شکل (۴)، می‌توان نتیجه گرفت که با صرف نظر کردن از نمونه‌های بدون خرده آسفالت، مقاومت هفت و بیست و هشت روزه نمونه بتن غلتکی حاوی پنجاه درصد خرده آسفالت، بیشترین مقاومت را در بین درصدهای مختلف RAP به خود



شکل ۵. مقاومت فشاری با مقدار مختلف (RAP) و ۸ درصد میکروسیلیس

نمونه‌های بدون خرده آسفالت نیز بیشترین مقاومت ۲۸ روزه را کسب کردند. شکل (۶) مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با ۱۲ درصد میکروسیلیس و نمونه مرجع نشان داده شده‌اند.

در این نمودار نیز مشخص است که نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد خرده آسفالت، در بین سایر نمونه‌های حاوی RAP، دارای بیشترین مقاومت فشاری هستند. همانطور که انتظار می‌رفت

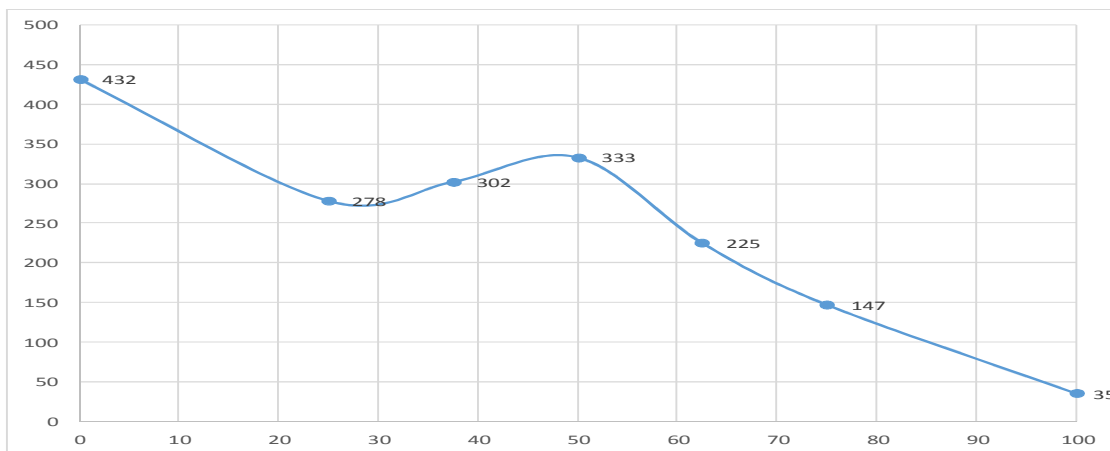


شکل ۶. مقاومت فشاری با مقدار مختلف (RAP) و ۱۲ درصد میکروسیلیس

۲۸ روزه در نمونه با پنجاه درصد RAP، بالاتر از مقاومت سایر مخلوط‌های بتن غلتکی بوده است. شکل (۷)، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با درصدهای مختلف خرده آسفالت باز یافتی و چهار درصد میکروسیلیس را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار شکل (۶)، آشکار است که با افزایش میکروسیلیس به مقدار ۱۲ درصد و به تبع آن افزایش میزان کندگیری بتن، مقاومت ۷ روزه بسیار پایین و مقاومت ۲۸ روزه، بسیار بالا است. همچنین با صرف نظر از نمونه شاهد، مقاومت

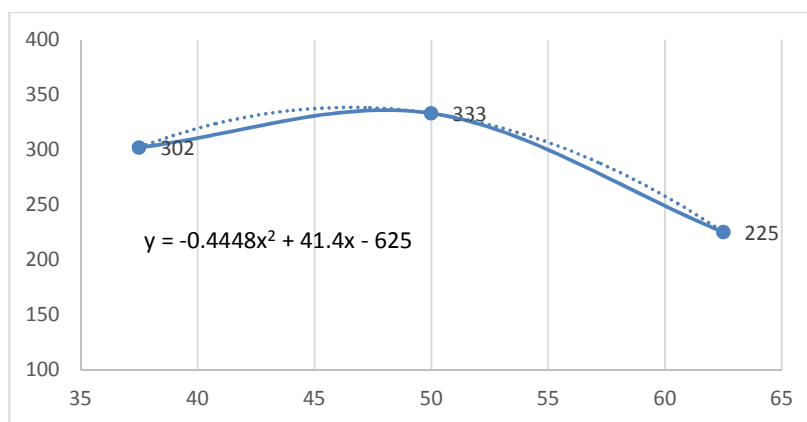




شکل ۷. مقاومت فشاری با درصد های مختلف آسفالت بازیافتی (صفر تا صد در صد) و ۴ درصد میکروسیلیس

همانطور که در این نمودار مشخص است با صرف نظر کردن از نمونه های بدون خرده آسفالت، مقدار مقاومت در نمونه های با ۵۰ درصد خرده آسفالت نسبت به سایر مخلوطها افزایش قابل ملاحظه ای داشته است. با هدف بالا بردن دقت در تعیین الگوی تغییرات مقاومت فشاری، نمونه های با مقدار خرده آسفالت

۳۷/۵ و ۶۲/۵ درصد نیز مطابق شرایط گفته شده ساخته شد و نتایج آزمایش مقاومت این نمونه ها نیز تعیین گردید. (شکل های ۷ و ۸) در ادامه مدلی جهت بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری در مقابل درصد خرده آسفالت در محدوده حداکثری مقاومت فشاری، ارایه گردید.



شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه های با درصدهای ۳۷/۵، ۵۰ و ۶۲/۵ درصد خرده آسفالت و ۴ درصد میکروسیلیس

با استفاده از رابطه (۱)، درصد خرده آسفالتی که مقاومت فشاری در آن به ازای ۴ درصد میکروسیلیس حداکثر است، مقدار ۶/۶ درصد، تعیین گردید. شکل های (۹) و (۱۰)،

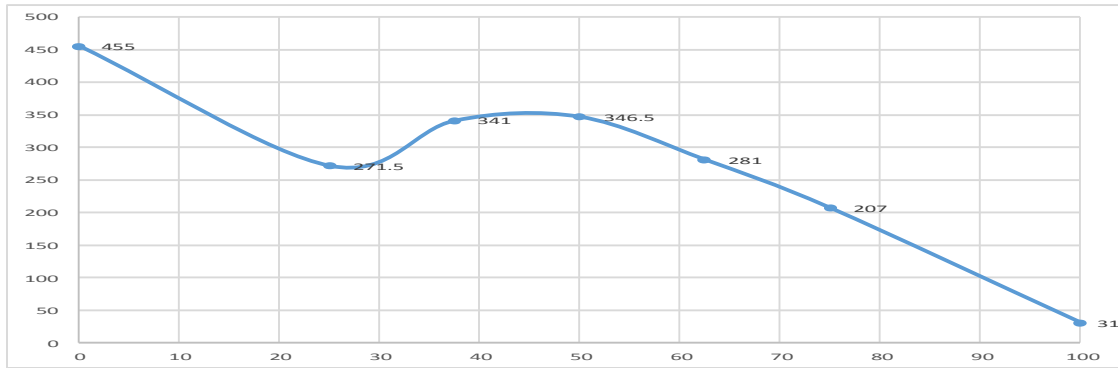
مقاومت فشاری نمونه های بتنی ساخته شده با درصدهای مختلف خرده آسفالت بازیافتی و ۸ درصد میکروسیلیس را نشان می دهند.

$$y = -0.444x^2 + 41.4x - 625$$

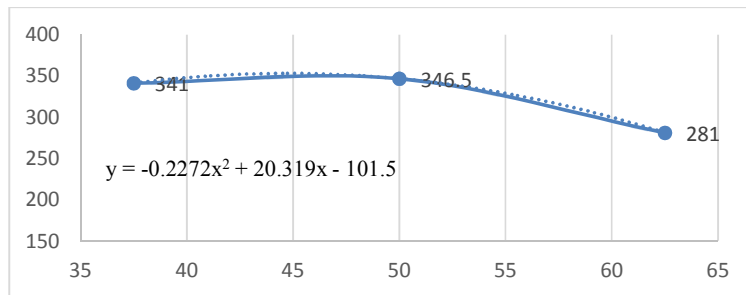
$$\frac{dy}{dx} = 2 \times 0.444x = 41.4$$

$$x = 46.6\%$$

(۱)



شکل ۹. مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی (صفر تا صد درصد) و ۸ درصد میکروسیلیس



شکل ۱۰. مقاومت فشاری با درصد‌های ۳۷/۵، ۵۰ و ۶۲/۵ درصد خرده آسفالت و ۸ درصد میکروسیلیس

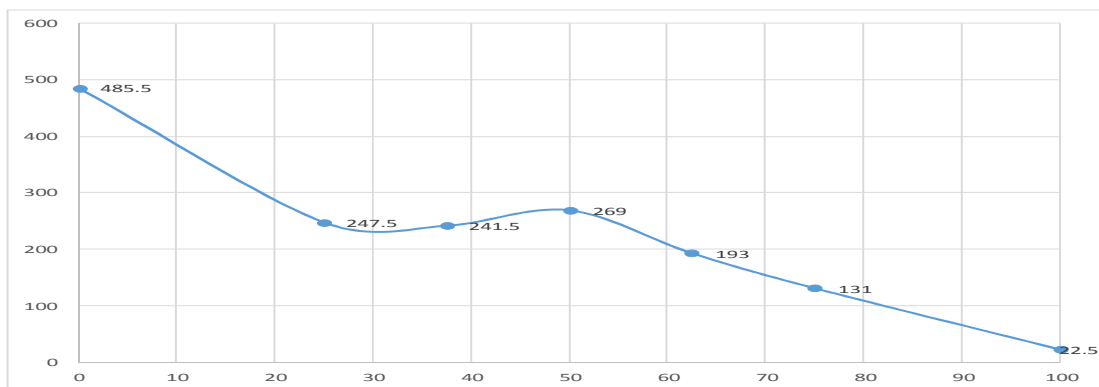
شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با درصد‌های مختلف خرده آسفالت و ۱۲ درصد میکروسیلیس را نشان می‌دهد.

در ادامه نیز مطابق رابطه (۲)، مشخص می‌شود که مقدار ۴۴/۷۵ درصد خرده آسفالت در نمونه‌های ساخته شده با ۸ درصد میکروسیلیس، بیشترین مقاومت فشاری را نتیجه می‌دهد.

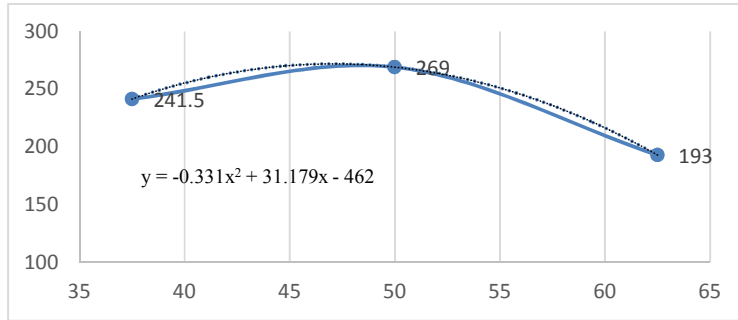
$$y = -0.2272 \times x^2 + 20.319 \times x - 101.5$$

$$\frac{dy}{dx} = 2 \times 0.2272 \times x = 20.319 \quad (2)$$

$$x = 44.75\%$$



شکل ۱۱. مقاومت فشاری با درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی (RAP) و ۱۲ درصد میکروسیلیس



شکل ۱۲. مقاومت فشاری با درصد های ۳۷/۵، ۵۰ و ۶۲/۵ درصد خرده آسفالت و ۱۲ درصد میکروسیلیس

درصد های مختلف میکروسیلیس در جدول (۶) آورده شده است. لازم به ذکر است این مقادیر مربوط به حالت بهینه استفاده از خرده آسفالت است.

مطابق رابطه (۳)، حداکثر مقاومت فشاری در این حالت، هنگام استفاده از ۴۷/۱ درصد خرده آسفالت بوجود می آید. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده، بیشترین مقاومت مخلوطها با

$$y = -0.331 \times x^2 + 31.179 \times x - 462$$

$$\frac{dy}{dx} = 2 \times 0.331 x = 31.179$$

(۳)

$$x = 47.1\%$$

جدول ۶. مقاومت فشاری نمونه های بتن غلتکی با درصد های مختلف میکروسیلیس در میزان خرده آسفالت بهینه

مقدار میکروسیلیس (درصد)	مقدار خرده آسفالت (درصد)	مقاومت (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)
۴	۴۶/۶۰	۳۴۰/۰۷
۸	۴۴/۷۵	۳۵۲/۷۹
۱۲	۴۷/۱۰	۲۷۲/۲۴

مشخص می شود که حداکثر مقاومت فشاری ۳۵۹ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نمونه هایی با ۴۷/۱ درصد خرده آسفالت و ۶/۵۵ درصد میکروسیلیس به دست می آید.

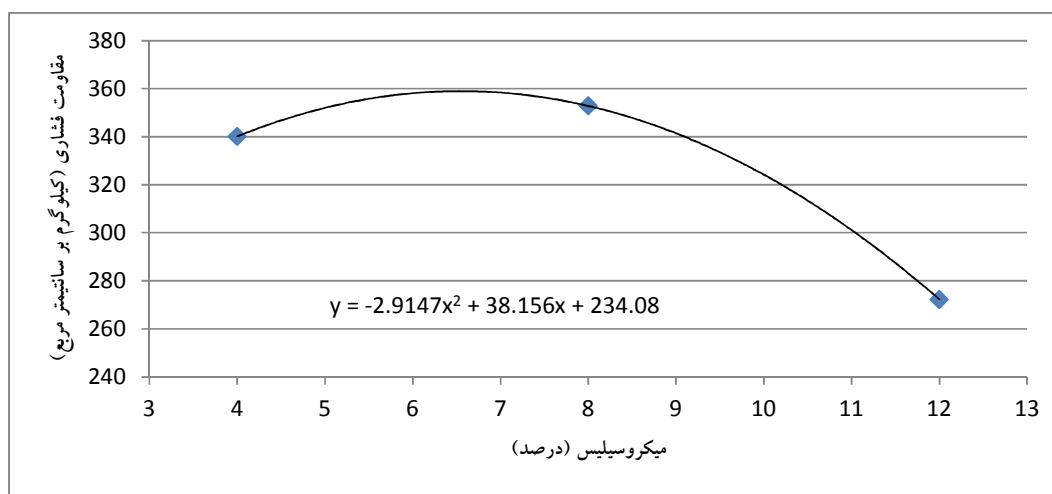
در نمودار شکل (۱۳)، تغییرات مقاومت حداکثری نمونه ها در مقادیر بهینه خرده آسفالت در مقابل مقادیر مختلف میکروسیلیس نشان داده شده است. با استفاده از رابطه (۴)

$$y = -2.9147 \times x^2 + 38.156 \times x + 234.08$$

$$\frac{dy}{dx} = 2 \times 2.9147 x = 38.156$$

(۴)

$$x = 6.55\%$$



شکل ۱۳. حداکثر مقاومت فشاری در درصد خرد آسفالت بهینه و با درصدهای مختلف میکروسیلیس

## ۷- نتیجه گیری

می‌گردد. اما کاهش آلودگی‌های زیست محیطی استفاده از این ضایعات را در بتن روسازی، توجیه می‌نماید.  
 -در مقدار خرد آسفالت ثابت، افزایش میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت بتن غلتکی حاصل می‌گردد.  
 -با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، میزان بهینه افزودنی برای ساخت بتن غلتکی، استفاده از ۶/۵۵ درصد میکروسیلیس و ۴۵/۱ درصد خرد آسفالت است.  
 -استفاده از خرد آسفالت بازیافتی در ساخت بتن غلتکی، علاوه بر اثرات مثبت زیست محیطی، با کاهش میزان استفاده از شن و ماسه و کاهش هزینه حمل مصالح، باعث کاهش هزینه نهایی پروژه‌های راهسازی می‌گردد.

در این تحقیق، تاثیر افزودن خرد آسفالت بازیافتی و میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن غلتکی، مورد بررسی قرارگرفت. بررسی نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته، نشان می‌دهد که:  
 -روند جذب آب با افزایش درصد میکروسیلیس استفاده شده، افزایش یافته است.  
 -در حین ساخت نمونه‌ها مشخص گردید که تراکم نمونه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر مقدار خرد آسفالت است.  
 -افزودن میکروسیلیس باعث کندگیر شدن بتن غلتکی حاصل می‌گردد.  
 -در مقدار ثابت میکروسیلیس، افزایش مقدار خرد آسفالت در ساخت بتن، عموماً باعث کاهش مقاومت فشاری بتن غلتکی

## ۱۰-مراجع

-Aghaeipour, A. and Madhkan, M., (2019), "Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)", Road Materials and Pavement Design, pp. 1-24.

-Ameli, A., Parvaresh Karan, E. and Hashemi, S.A.H., (2020), "Development of designs for RCC mixtures with waste material", International Journal of Pavement Engineering, pp. 1-13.  
 DOI: 10.1080/10298436.2020.1722817.

## ۸-پی‌نوشت‌ها

1. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
2. Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)
3. Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS)

## ۹- سپاسگزاری

نویسندگان بدینوسیله از زحمات جناب آقای مهندس معصومی، مسئول محترم آزمایشگاه مکانیک خاک پروژه راه تنکابن-الموت- قزوین که امکان انجام آزمایش‌های این پژوهش را فراهم ساختند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

- ISIRI No. 391, (2019), "Hydraulic cement-determination of autoclave expansion method-test method", ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI Number 391, 5th. revision.
- ISIRI No. 392, (2015), "Cement-determine the time of setting of hydraulic cement by vacate needle-test methods", ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI Number 392, 1<sup>st</sup> revision.
- ISIRI No. 393, (2016), "Cement-determination of flexural and compressive strengths-test method", Islamic Republic Of Iran, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI Number 393, 2st. revision.
- ISIRI No. 394, (2015), "Cement-determination of the heat of hydration of hydraulic cement-test method", ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI Number 394, 1st. revision.
- ISIRI No. 1692, (2017), "Hydraulic cement-test methods for chemical analysis determination of major components", ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI Number 1692, 1st. revision.
- Karimi, M., Hassani, A., Ahmadi, A. and Arab Ameri, H., (2011), "Laboratory investigation about utilization of recycled asphalt pavements as a substitute for aggregates in roller compacted concrete pavements", Quarterly Journal of Transportation Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 69-79.
- Madani, H., Pourkhorshidi, A., Parhizkar, T. and Sobhani, J., (2017), "The mechanical and durability characteristics of roller compacted concrete (RCCP)", Sharif Journal of Civil Engineering, Vol. 33.2, No. 3.1, pp. 39-45, doi: 10.24200/j30.2017.20075.
- Mak, T.M., Chen, P.C., Wang, L., Tsang, D.C., Hsu, S.C. and Poon, C.S., (2019), "A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong", Journal of Cleaner Production, Vol. 241, No. 118309, pp. 98-112.
- Ameli, A., Parvaresh Karan, E. and Hashemi, S., (2018), "Mechanical properties and performance of roller compacted concrete (RCC) containing high volume of fly ash, crumb rubber and nano silica using response surface method", Journal of Transportation Research, Vol. 15, No. 3, pp. 381-395.
- Code No. 354, (2009), "Guideline for design and construction of rolled compacted concrete pavements", Ministry of Roads and Transportation, Deputy of Training; Research and Information Technology, Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution Systems.
- Code No. 731, (2017), "Design, construction and maintenance manual for highways concrete pavements", The Ministry of Road & Urban Development Construction and Development of Transportation Infrastructures Company Road, Housing & Urban Development Research Center, Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs Department of Technical and Execution Affairs.
- Debbarma, S., Ransinchung, G.D., Singh, S. and Sahdeo, S.K., (2020), "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, No. 104504, pp. 1-14.
- Fardad, M., (2018), "Study on carbonation phenomenon impact on RCC pavements (RCCP) technical performance", Road, Vol. 26, No. 96, pp. 145-159.
- Fattahi, M., Khabiri, M. and Yarahmadi Bafghi, A., (2018), "Assessment the effect of waste mine stone on the strength of roller compacted concrete pavement", Journal of Transportation Research, Vol. 15, No. 2, pp. 119-134.
- ISIRI No. 390, (2014), "Cement-determination of the fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus-test methods", ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI Number 390, 1st. revision.

- Pérez, I.P., Pasandín, A.M.R., Pais, J.C. and Pereira, P.A.A., (2019), "Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 220, pp. 87-98.
- Pourabdollah, H. and Dabiri, R., (2017), "Effects of micro silica on mechanical properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) in cold regions", *Journal of Concrete Structure and Material*, Vol. 2, No. 1, pp. 48-64.
- Shatarat, N., Alhaq, A.A. and Katkhuda, H. (2019), "Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 217, pp. 384-393.
- Zolghadri, S., Gholizade, V. and Maghsodi, A., (2017), "Design, implementation and evaluation of roller concrete pavements to prevent and reducing the breakdowns case study: using RCC in the domestic Roads of the PREFAB Company", *Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 2, No.1, pp. 5-24.  
doi: 10.30478/jcsm.2017.54793.
- Modarres, A. and Hosseini, S., (2015), "Investigation of behavioral characteristics of roller compacted concrete containing recycled asphalt pavements", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 297-31.
- Modarres, A., Hesami, S., Soltaninejad, M. and Madani, H., (2018), "Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 748-761.
- Mohammed, B.S. and Adamu, M., (2018), "Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica", *Construction and Building Materials*, Vol. 159, pp. 234-251.
- Nguyen, T.H.G., Nguyen, T.D., Tran, T.H., Bui, X.C. and Nguyen, M.L., (2020), "Investigation of the use of reclaimed asphalt pavement as aggregates in roller compacted concrete for road base pavement in Vietnam", *In CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, Vol. 54, pp. 513-518.

# Determine the optimal amount of RAP and Micro Silica in Roller Compacted Concrete Pavement

*Hassan Divandari, Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.*

*Yaser Bashkoul, M.Sc., Grad., Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.*

*E-mail: divandari@iauns.ac.ir*

Received: August 2021-Accepted: November 2021

## **ABSTRACT**

Massive amount of debris and trashes, one of the issues and problems of today's world is the especially asphalts debris resulting from the removal of worn-out pavements of urban roads. Recycled asphalt crumbs are waste materials that certainly have significant undesirable effects on the surrounding environment. Given the properties reported by these materials, there are various ways to reuse these materials. One of the applications that have been considered by researchers is the use of these materials in cement mixtures, including concrete production. This is while that a large amount of asphalt fragment is continuously produced in the repair and maintenance of roads. It is therefore desirable to be used in conventional mixtures used in Construction of roads pavement. In this regard, the present study investigates the performance Evaluation of Roller Compacted Concrete Pavement make by Recycled Asphalt using Micro Silica with the aim of reducing waste and its negative impacts on the environment. By examining the documentation and performing numerous experiments, it has been found that roller compact concrete made from recycled asphalt can be used as a suitable pavement for low traffic and rural roads, as well as for the final covering of a wide range of sidewalks. It is also suitable as CBT.

**Keywords:** Recycled Asphalt Pavement, RCC, Micro Silica, Compressive Strength