نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal(CPJ)

امکان سنجی استفاده از خاکستربادی وخاکسترکف زباله‌سوزها درساخت بتن و روسازی‌های آسفالتی

محمد صحرائی‌کرم بستی [۱*]، حسن دیواندری [۲]، بهنام ابوالفتحی [۳]

۱- دانش پژوه مقطع کارشناسی ارشد، گروه راه وترابری، واحدنوشهر، دانشگاه آزاداسلامی، نوشهر، ایران

Mohammadsahraei۲۵۰@gmail.com

۲- گروه‌عمران، واحدنوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

h.divandari@gmail.com

۳ - فارغ التحصیل مقطع کارشناسی، مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۴

چکیده

پسماند جامد یکی از معضلات مدیریت شهری است.کل زباله‌های جامد کره زمین در یکسال اخیر برابر ۱/۳میلیارد تن بوده که میزان آن هر ساله درحال افزایش است. مدیریت پسماند و استراتژی کاربرد آن یکی از نگرانی‌های عمده در اکثر کشورهاست. دفن‌زباله و سوزاندن پسماند دو راهکار اساسی دفع پسماند جامدشهری در دنیاست. کمبود زمین مناسب، هزینه بالا ، قوانین سخت گیرانه متعدد، مخالفت عمومی برای احداث مکان‌های دفن زباله و نیز آلوده شدن محیط زیست توسط آنها از جمله عواملی است که موجب می‌شود محققان سوزاندن پسماندها را به دفن آن ترجیح دهند. سوزاندن زباله‌های جامد شهری یکی از پرکاربرد ترین روش‌های دوستدار محیط زیست می‌باشد که می‌تواند حجم زباله‌های خانگی را به طور قابل توجهی حدودا تا ۹۰٪ کاهش دهد، بنابراین در حفظ محیط زیست نقش مهمی را ایفاء می‌کند. محصول این روش خاکستر بادی و خاکستر کف زباله‌های سوخته شده در تأسیسات زباله‌سوزی است. در اوایل دهه هفتاد میلادی در ایالات متحده آمریکا گزارش‌هایی در ارتباط با کاربرد خاکستر زباله‌های جامد شهری درآسفالت منتشر شد. در دهه ۸۰ میلادی نیز در کشور هلند تعدادی پروژه با محوریت آسفالت حاوی خاکستر کف زباله‌های جامد شهری انجام شد. هدف از این پژوهش استفاده بهینه از خاکسترکف زباله‌های جامد شهری و جلوگیری از آسیب‌های زیست محیطی و گسترش مکان‌های دفن زباله است. دراین پژوهش مشخصاً امکان استفاده از خاکسترهای بادی و خاکسترهای کف زباله سوز به عنوان افزودنی در قیر و بتن آسفالتی و نیز لایه‌های زیرین روسازی جاده ها مورد بررسی قرارگرفت. نتایج حاصل از آن نشان داد استفاده از خاکسترهای بادی و کف زباله سوزها به عنوان مصالح جایگزین مانند فیلر و یا ذرات ریزدانه در دانه بندی آسفالت امکان پذیر بوده و نیز درحل معضل دفن زباله، بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی آسفالت تاثیر بسزایی دارد.

کلمات کلیدی: خاکستر زباله سوز، عملکرد روسازی آسفالتی، دانه بندی باز، آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، ویسکوزیته

۱- مقدمه

سالانه میلیون‌ها تن پسماند جامد شهری تولید می‌شود. پسماند جامد یکی از معضلات کلان شهرهاست. مدیریت پسماند و استراتژی کاربرد آن یکی از نگرانی‌های عمده در اکثر کشورهاست. دفن‌زباله و سوزاندن پسماند دو راهکار اساسی دفع پسماند جامدشهری در دنیاست. کمبود زمین مناسب، هزینه بالا، قوانین سخت گیرانه متعدد، مخالفت عمومی برای احداث محل دفن زباله و نیز آلوده‌شدن محیط زیست توسط آن از جمله عواملی است که موجب می‌شود محققان سوزاندن پسماندها را به دفن آن ترجیح دهند.[۱] فنآوری زباله سوزی روشی است که به زباله‌های جامد با حرارت بالا اعمال می‌شود و در اثر آن زباله‌های جامد به گاز یا خاکستر تبدیل می‌شود. درحین این فرآیند زباله‌های جامد تقریبا به خاکستر تبدیل شده و مواد خطرناک نیز از بین می‌رود. علاوه بر این، گرمای تولیدی درحین فرآیند زباله سوزی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود از این رو فرآیند زباله سوزی روش مناسبی برای کاهش آلودگی و بازیافت زباله‌های جامد می‌باشد. جهت اثبات مطالب فوق بر اساس اطلاعات منتشر شده توسط اداره کل حفاظت محیط زیست تایوان خاکستر تولیدی از زباله سوزها در کشور تایوان معادل ۹۰۲۰۰۰ تن حدفاصل ماه‌های ژانویه تا اکتبر سال ۲۰۱۱ بوده است. ازاین مقدار ۷۱۹۰۰۰ تن را خاکستر کف زباله سوز تشکیل داده که۴۲۹۰۰۰ تن از آن روانه مناطق دفن زباله شده است. اگر خاکستر کف به طور مداوم به این مناطق انتقال یابد، بار محیط زیستی بزرگی بر دوش کشور تایوان گذاشته خواهد شد که خود جزیره‌ای با دسترسی محدود به اراضی می‌باشد. امروزه روش‌های نوینی برای استفاده از خاکستر زباله‌های جامدشهری در سراسر جهان مطرح و مورد آزمایش قرار داده شده است. اصلی ترین کاربرد آن در رشته راه و ترابری افزودن این مواد به لایه‌های زیراساس، اساس و لایه‌های روسازی بتن آسفالتی می‌باشد.[۲] سوزاندن زباله‌های جامد شهری یکی از پرکاربردترین روش‌های دوستدار محیط زیست است که می‌تواند حجم زباله‌های خانگی را به طور قابل توجهی به میزان ۹۰٪ کاهش دهد بنابراین نقش مهمی در حفظ زیست محیطی را ایفا می‌کند. خاکستر بادی ناشی از این روش که محصول زباله‌های در حین سوختن در تأسیسات زباله سوزی است، به علت آن که حاوی سم فلزات سنگین مانند کادمیم، جیوه، سرب و مقادیری از ترکیبات ارگانیک سمی است، معمولا در دسترس افراد قرار داده نمی‌شود و بلافاصله روانه مناطق دفن زباله می‌شود. اما عموما خاکستر کف زباله سوزکه از زباله‌های ناهمگن خاکستری تیره مخلوط در مقادیر بالای آب که خود بوی نامطبوعی دارد بدست می‌آید در دسترس است. ترکیبات تشکیل دهنده خاکستر کف زباله سوز به ترتیب شامل: سیلیکا ، آلومینا ، فریک اسید و اکسید کلسیم می‌باشد که همگی آنها مواد غیر آلی به شمار می‌روند.[۱]،[۲]،[۳]

۲- ضرورت تحقیق

کل زباله‌های جامد شهری کره زمین در یکسال اخیر برابر۱/۳ میلیارد تن بوده که میزان آن هر ساله در حال افزایش است و محققان نیز در وهله‌ی اول جهت آلودگی کمتر محیط زیست سوزاندن زباله‌ها را به دفن آن ترجیح می‌دهند. اما مسئله این است آیا خاکستر با توجه به کاهش حجم گسترده ناشی از زباله سوزی باید مجددا دفن شود؟

پاسخ مسلماً خیر است. سوزاندن پسماندها منجر به تولید خاکستری می‌شود که مخلوطی از آلودگی‌های آلی (دی اُکسین و فوران)، فلزات سنگین مانند جیوه، منگنز، کُروم،کادمیوم و سرب و بخشی متغیر که معمولا شامل نمک‌ها می‌باشد. ریز بودن اندازه خاکستر و حضور فلزات سنگین در آن‌ها که به آسانی بر روی زمین پخش می‌شوند از جمله عواملی هستند که باعث می‌شوند این خاکسترها در زمره پسماندهای خطرناک طبقه بندی شوند.[۳] از این سو پیشرفت روز افزون علم باعث شده نه تنها این مشکل به روش‌های مختلف حل شود بلکه خاکسترهای زباله سوز در تولید بتن به عنوان مصالح ریزدانه، تولید آجر و حتی آسفالت مورد استفاده قرارگیرد. در این تحقیق سعی شده که امکان استفاده ازخاکسترکف و خاکسترباد‌ی به عنوان افزودنی‌در قیر وبتن آسفالتی و نیز لایه‌های زیرین روسازی مورد بررسی قرارگیرد.[۴]

۳- مبانی پژوهش

در اوایل دهه هفتاد میلادی در ایالات متحده آمریکا گزارش‌هایی در ارتباط با کاربرد خاکستر زباله‌های جامد شهری در آسفالت منتشر شد. در کشور هلند نیز در اوایل دهه ۸۰ میلادی تعدادی پروژه با محوریت آسفالت حاوی خاکستر کف زباله‌های جامد شهری انجام شد که جهت استفاده بهینه از خاکستر کف زباله‌های جامد شهری و جلوگیری از آسیب‌های زیست محیطی و گسترش لندفیل‌ها بوده‌است. امروزه نیز هدف، گسترش این تفکرات و ارزیابی نتایج حاصل از آنهاست. جهت سهولت در فهم مطالب فوق به تعدادی از تعاریف مرسوم در این مقاله پرداخته می‌شود. [۵]،[۲]

۱- خاکستر کف زباله‌های جامد شهری[۱] : به خاکستر حاصل از سوختن زباله‌ها در پایین کوره زباله سوز گفته می‌شود.
۲- خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری[۲]: به خاکستر حاصل از سوختن زباله‌ها که توسط فیلترهای دودکش زباله سوز جذب می‌گردد.
۳- آسفالت با دانه بندی باز[۳]: به آسفالتی که دانه بندی مصالح سنگی آن میان تهی باشد گفته می‌شود.

۴-پیشینه پژوهش

یکی از راه‌های دفع زباله سوزاندن آن است. اولین واحد زباله سوز در سال ۱۸۷۴ توسط دو مهندس آمریکایی بنام هرینگ و گریلی در شهر ناتینگهام انگلستان ساخته شد. این دو تا سال ۱۹۲۱ موفق به ساخت بیش از ۲۰۰ واحد زباله سوز در بریتانیا شدند. در حال حاضر در بسیاری از کشورها سوزاندن زباله مرسوم است و به عنوان یکی از روش‌های دفع انواع زائدات به شمار می‌رود به عنوان مثال در کشور سوئد ۵۰٪ و سنگاپور و دانمارک هر یک ۶۵٪ و در ژاپن ۷۵٪ زائدات و آمریکا ۲۹٪ زائدات در کوره‌های زباله‌سوزی به خاکستر تبدیل می‌شود. در سال‌های اخیر این خاکسترها به عنوان مصالح ریزدانه، فیلر و افزودنی مورد استفاده قرار گرفته است. در موارد ذیل به طور کلی ارائه می‌گردد.[۴]

۴-۱ ریزدانه بتن

ازخاکسترزباله‌سوز می‌توان به عنوان ریزدانه در بتن استفاده کرد و تنها مشکل اصلی در این امر یکی مقاومت فشاری بتن و دوم آلودگی شیرابه‌های آن است که معمولاً بافلزات سنگین همراه است. برای بدست آوردن بتن مناسب باید مقدار آلومینیوم و بطری‌های شیشه‌ای را در زباله شهری کاهش داد.[۴]مقاومت فشاری بتن با ۴۰٪ خاکستر تولیدی برابر با ۴/۱۴ مگاپاسکال است. جدول ۱ تست نفوذ فلزات سنگین را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تمامی فلزات غیر از آرسنیک و کروم مقدار نفوذشان در محدوده مجاز است. همچنین از خاکستر زباله سوزها در تولید بلوک سیمانی سبک استفاده شده است. در مجموع می توان گفت بتن ساخته شده با خاکستر کف بتنی با مقاومت فشاری مناسب است.

[۱] Municipal solid waste incinerator bottom ash
[۲] Municipal solid waste incinerator fly ash
[۳] Open graded asphalt concrete

جدول۱: تست نفوذ فلزات سنگین [٤]

عنصر	میانگین	داده های خام			مقدار استاندارد جذب آب
		۱-۳	۱-۲	۱-۱	
نقره	N.D	N.D	N.D	N.D*	۰.۱
آرسنیک	۰.۳۰۵	۰.۳۰۹	۰.۳۲۳	۰.۲۸۳	۰.۰۵
کادمیم	N.D	۰	N.D	۰	۰.۰۰۵
کروم	۰.۳۱۷	۰.۳۹۶	۰.۳۲۲	۰.۲۳۴	۰.۱
کبالت	۰.۰۲۶	۰.۰۴۴	N.D	۰.۰۳۸	۱
آهن	۰.۰۲۳	۰.۰۲۷	۰.۰۱۶	۰.۰۲۸	۰.۳
منگنز	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۵
نیکل	N.D	N.D	N.D	N.D	۰.۱
سرب	۰.۰۱۵	۰.۰۲	۰.۰۱۱	۰.۰۱۵	۰.۰۱۵
سلنیوم	۰.۰۵۶	۰.۰۶۳	۰.۰۵۹	۰.۰۴۵	۰.۰۵
قلع	۰.۰۱۳	۰.۰۰۶	۰.۰۰۹	۰.۰۲۴	۵

۲-۴ استفاده از خاکستر کف به عنوان پایه سیمان سبک

وزن مخصوص بتن حاصل از خاکستر در حدود ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. که این مقدار نصف وزن مخصوص بتن ساخته شده با ماسه است. در جدول ۲ مشخصات فیزیکی سیمان ساخته شده از خاکستر مشاهده می‌شود.[۴]

جدول۲: مشخصات فیزیکی بتن تهیه شده از خاکستر[۴]

نمونه	درصد رطوبت	وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص تر
۱	۳۲.۴	۱۱۶۵	۱۵۴۲
۲	۲۹.۱	۱۱۳۳	۱۴۶۳
۳	۳۳	۱۱۴۰	۱۵۱۶
۴	۲۳.۵	۱۲۲۹	۱۵۱۸
میانگین	۲۹.۵	۱۱۶۶/۸	۱۵۰۹/۸

۴- ۳ استفاده از خاکستر کف زباله سوز در آسفالت با دانه بندی باز

جهت آزمایش اثرات استفاده از خاکستر کف زباله سوز[۴] در آسفالت با دانه بندی باز[۵] مصالح ریزدانه معمولی می‌تواند تا حدودی با خاکستر کف زباله سوز در آسفالت با دانه بندی باز جایگزین شود. نتایج نشان داده استفاده از خاکستر کف زباله سوز به بهبود نیروی چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها کمک می‌کند. همچنین پایداری و مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت با دانه‌بندی باز با جایگزین کردن خاکستر کف زباله‌سوز به طور موثری بهبود یافته است. مصالح ریز دانه معمولی در آسفالت با دانه بندی باز ۲۵٪ دانه بندی را تشکیل می دهد. عناصر فیزیکی تشکیل دهنده خاکستر کف زباله‌سوز شامل: خاکسترآهن، سرامیک، شیشه، مواد غیر قابل اشتعال و محصولات ارگانیک که نتیجه آن احتراق ناقص می باشد.[۲]

ظاهرا خاکستر کف زباله سوز یک نوع پلیمر سبک متخلخل با ذرات درشت و نامنظم کروی شکل می‌باشد. وزن مخصوص خاکستر کف زباله سوز تقریباً ۹۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و چگالی نسبی آن بین ۱/۸و ۲/۴ می‌باشد که بسیار سبک تر از مصالح ریزدانه معمولی است. ترکیبات شیمیایی اساسی خاکستر کف زباله سوز شامل : سیلیکا[۶] ، اکسید کلسیم[۷] ، اُکسید آهن[۸]و آلومینیوم اکسید[۹]است. در کشور تایوان به علت جنس زباله های جمع آوری شده خاکستر کف زباله سوز شامل مقادیر بالایی از سیلیکا و اکسید آهن است. اداره کل فدرال بزرگراه‌های تایوان پیشنهاد داده که بعد از مرحله جداسازی مواد فلزی و غیر فلزی با آهن ربا می‌توان از خاکستر کف زباله‌سوز یک دانه بندی درشت با توزیع مناسب ارائه داد که از آن با مصالح ریزدانه معمولی برای تولید آسفالت بهره برد.[۲] توصیه شده در لایه آستر، رویه و لایه‌اساس کمتراز ۲۵٪ وزنی از خاکسترکف و در لایه رویه روسازی آسفالتی کمتر از ۱۵٪ خاکستر کف مورد استفاده قرارگیرد. ولی درکل می‌توان گفت در روسازی آسفالتی استفاده از مقادیر بالای ۲۵ درصد نیز امکان پذیر است.

۱-۴- ۳ مصالح و روش های کار

قیر مورد استفاده در این آزمایش از نوع اصلاح شده می‌باشد. در این پژوهش نتایج ویژگی‌های قیراصلاح شده و استانداردهای آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

[۴] Incinerator bottom ash (IBA)
[۵] Open graded asphalt concrete (OGAC)
[۶] Sio۲
[۷] Cao
[۸] Fe۲o۳
[۹] Al۲o۳

جدول۳ : ویژگی های اساسی قیراصلاح شده[۲]

آزمایش	نتایج	معیار
وزن مخصوص	۱.۰۳۹	----------
ویسکوزیته (۶۰ درجه سانتی گراد)	۹۸۰۰	>۸۰۰۰
دمای اختلاط(۲۰±۱۷۰) درجه سانتی‌گراد	۱۸۱-۱۸۷	۱۷۰±۲۰
دمای کوبش(۳۰±۲۸۰درجه سانتی‌گراد)	۱۶۶-۱۷۲	۲۸۰±۳۰
نفوذ(۲۵ درجه سانتی گراد ، ۱۰۰گرم)	۵۲.۲	>۳۵

همچنین بعد از انجام آزمایش‌های پایه بر روی خاکستر کف و مصالح ریزدانه معمولی برای پی بردن به ویژگی‌های مواد مورد استفاده، خاکستر کف در درصدهای زیر با مصالح ریزدانه معمولی جایگزین شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

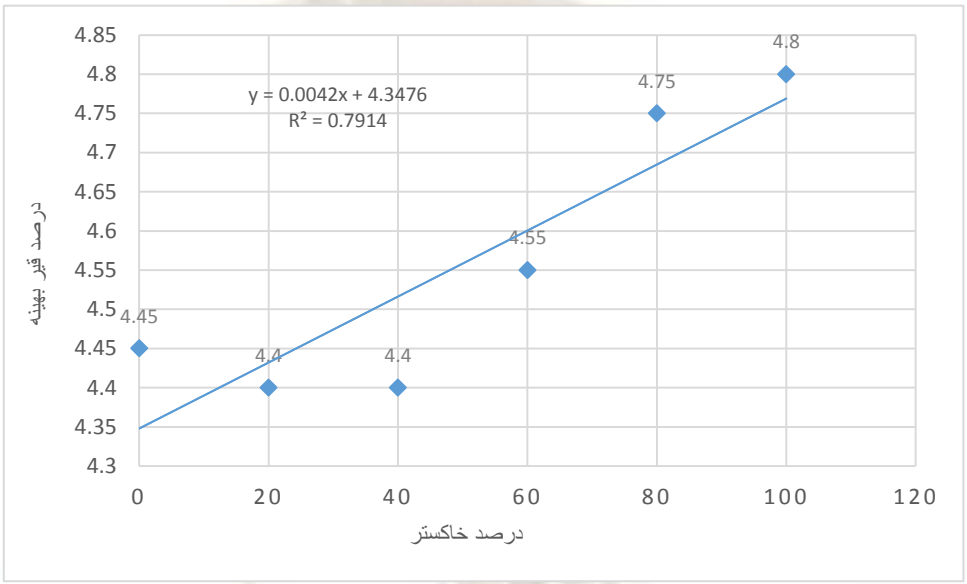
جدول۴ : طرح اختلاط دانه بندی پیشنهاد شده[۲]

مقدار جایگزین	۰٪	۲۰٪	۴۰٪	۶۰٪	۸۰٪	۱۰۰٪
مصالح درشت‌دانه ٪	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰
مصالح ریز دانه ٪	۸	۶/۴	۴/۸	۳/۲	۱/۶	۰
خاکستر کف زباله سوز٪	۰	۱/۶	۳/۲	۴/۸	۶/۴	۸
فیلر (پر کننده) ٪	۲	۲	۲	۲	۲	۲

ویژگی‌های مکانیکی آسفالت حاوی خاکستر کف زباله سوز از طریق آزمایش‌های مختلفی مانند: مقاومت کششی غیر مستقیم، خزش استاتیکی، خزش دینامیکی و.. ارزیابی شده است . [۲]،[۶]،[۷]

۳-۴-۲ مقادیر قیر بهینه

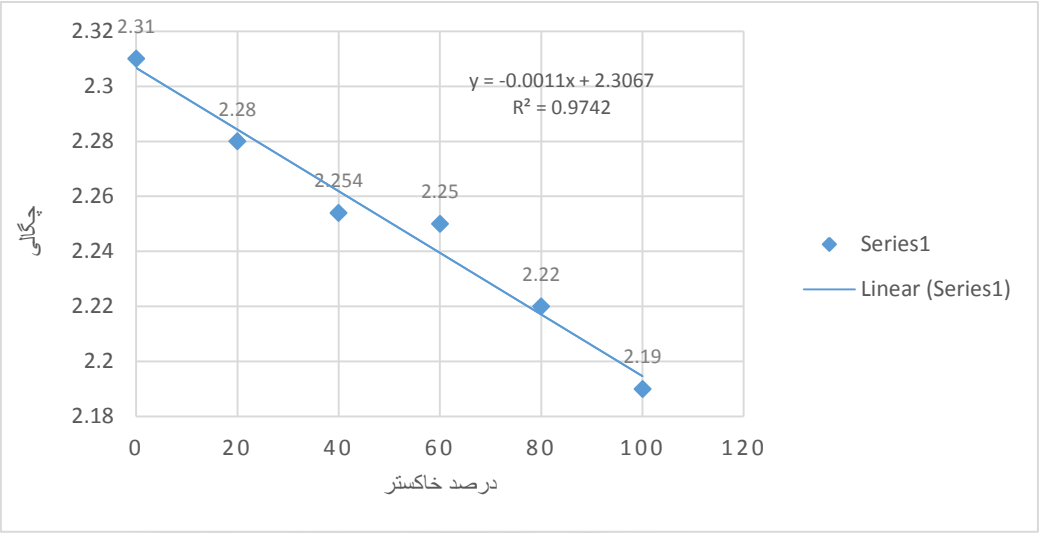
براساس نتایج بدست آمده از مطالعات پیشین، مقدار قیر بهینه در آسفالت با دانه بندی باز حاوی خاکستر کف زباله سوز متناسب با مقدار خاکستر کف می‌باشد. نمودار ۱ نشان دهنده رابطه میان مقدارقیر بهینه و مقدار خاکستر کف جایگزین شده برای طرح اختلاط در آسفالت با دانه‌بندی بازمی‌باشد[۲]. با توجه به نتایج طرح اختلاط، زمانی که مقدار خاکستر کف کمتر از ۶۰٪ است، مقدار قیربهینه درآسفالت با دانه بندی باز ۰.۱٪ افزایش دارد. حال اگر ۱۰۰٪ از خاکستر کف زباله سوز جایگزین مصالح ریزدانه شود میزان قیربهینه در این نوع آسفالت ۰.۳٪ افزایش دارد. در مجموع استفاده از خاکستر کف در دانه بندی باز اندکی قیمت آسفالت را بالا می‌برد.



شکل ۱: رابطه میان قیر بهینه و درصد خاکستر کف زباله سوز [۲]

۳-۴-۳ ارزیابی وزن مخصوص

درتحقیقات انجام شده در رابطه با چگالی شکل(۲) ارتباط بین وزن مخصوص و درصد خاکستر کف جایگزین در طرح اختلاط آسفالت با دانه بندی باز را نشان می‌دهد. با توجه به مشاهدات در شکل (۲) وزن مخصوص با افزایش خاکستر کف جایگزین کاهش یافته است.[۲] به این دلیل که خاکستر کف زباله سوز بسیار متخلخل و سبک است و بیشترین چگالی مختص زمانی است که درصد خاکستر جایگزین ۰٪ می‌باشد که برابر است با ۲۳۱۷ کیلوگرم بر متر مکعب وکمترین چگالی با ۱۰۰٪ خاکستر کف برابر با ۲۱۸۸ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.



شکل۲ : ارتباط بین چگالی و درصد خاکستر کف جایگزین[۲]

همچنین رابطه‌ای بین افزایش درصد خاکستر کف و ضخامت لایه آسفالتی وجود دارد، بدین شرح که با افزایش درصد خاکستر کف در آسفالت ضخامت لایه آسفالتی افزایش می یابد که سطح ناصاف ذرات خاکستر کف زباله سوز همانند الیاف اضافه شده به آسفالت عمل می‌کند و موجب افزایش ضخامت آسفالت می‌شود، گرچه افزایش ضخامت آسفالت به بالا رفتن مقاومت آن در برابر کهنگی و ممانعت از نفوذ آب به داخل آسفالت کمک می‌کند، اما کیفیت روسازی را کاهش و هزینه ساخت آن را افزایش می‌دهد.

۳-۴-۴ تحلیل تصاویر دمایی

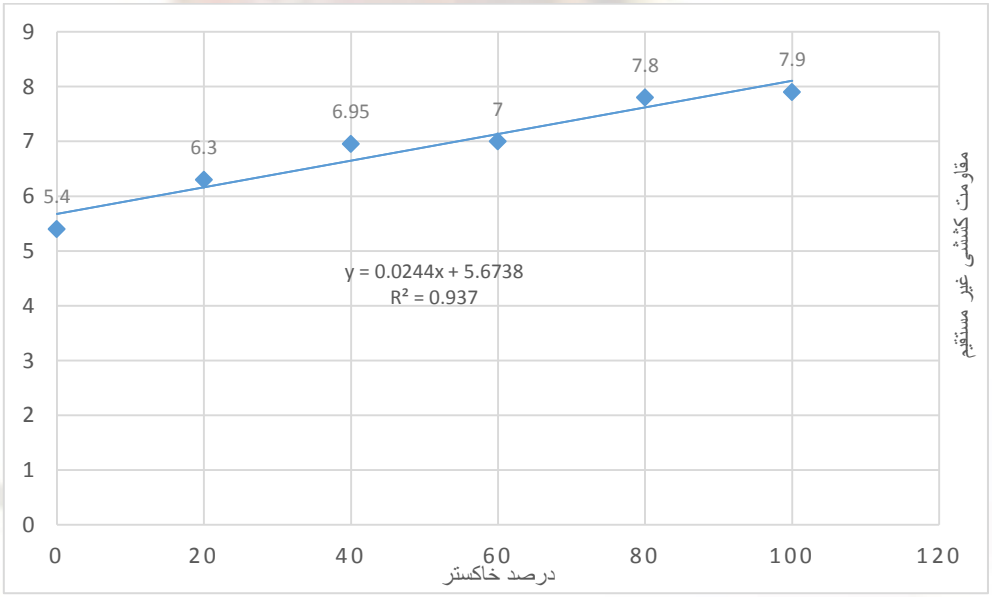
در تحقیق اخیر جهت ارزیابی بیشتر اثرات جایگزینی خاکستر کف زباله سوز و دست‌یابی به آسفالت همگن با دانه بندی باز تصاویر دمایی مورد بررسی قرار گرفت.[۲] برای به حداقل رساندن خطاهای ممکن تصاویر پس از پخش مخلوط آسفالتی با دانه بندی باز ثبت شده است، علاوه بر آن، این تصاویر در یک زاویه و ارتفاع گرفته شده و نتایج توزیع درجه حرارت در آسفالت با دانه بندی باز حاوی خاکستر کف جایگزین در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود به راحتی می توان فهمید که با افزایش درصد خاکستر دمای آسفالت به وضوح کاهش می‌یابد.

جدول ۵ : میانگین دمای آسفالت با دانه بندی باز حاوی درصدهای متفاوت خاکستر کف زباله سوز[۲]

مقدار خاکستر کف جایگزین٪	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
میانگین دما (درجه سانتی گراد)	۱۳۸/۰۳	۱۳۴/۷۷	۱۳۰	۱۲۶/۹	۱۲۱/۸	۱۱۸/۸۹

۳-۴-۵ آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

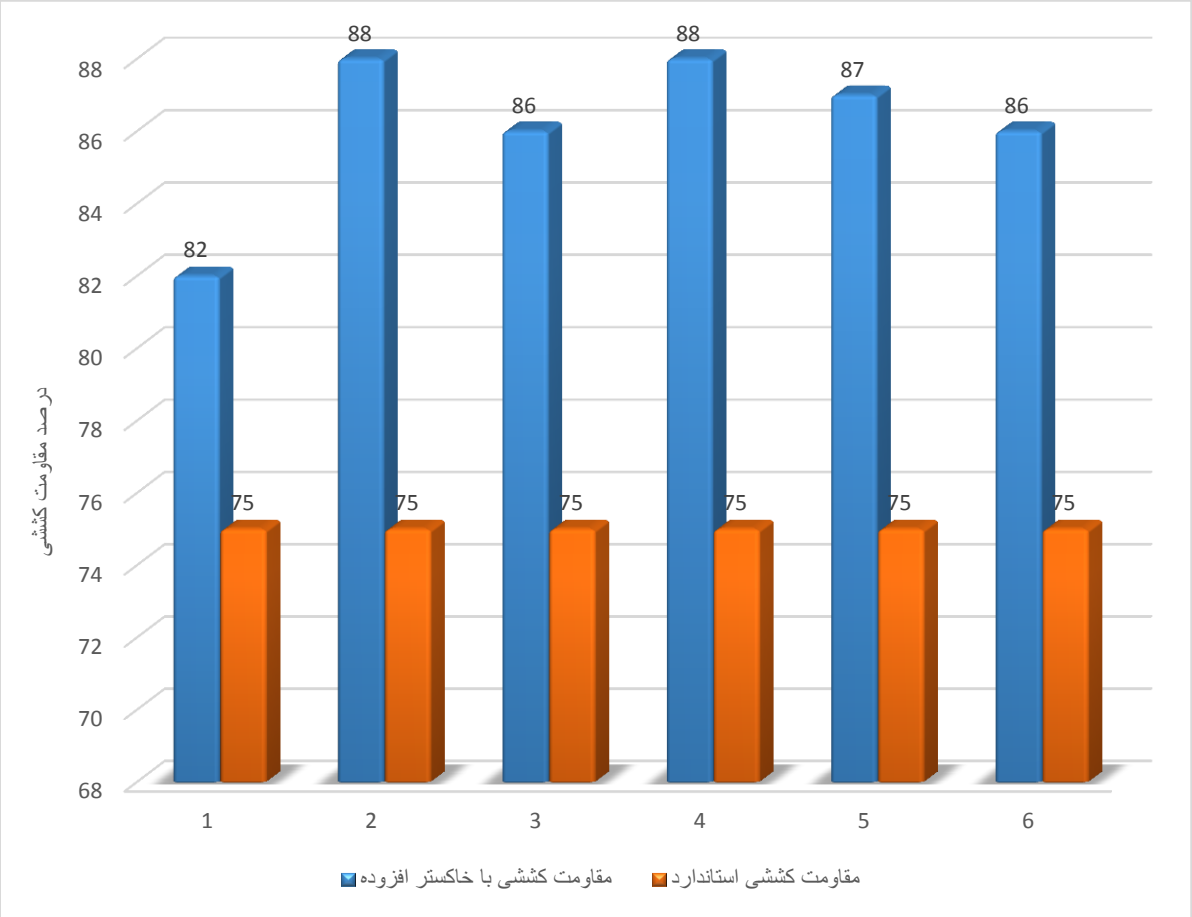
در تحقیقات به عمل آمده در تایوان رابطه میان مقاومت کششی غیر مستقیم و مقدار خاکستر کف جایگزین بدست آمد. شکل ۳ نشان می‌دهد در این آزمایش ذرات مربع شکل خاکستر کف زباله سوز با شن و ماسه ریزدانه معمولی مقایسه شده و با توجه به این که خاصیت درهم تنیدگی بین ذرات خاکستر کف بیشتر از ماسه ریز دانه بوده و مقاومت کششی نمونه‌های آسفالت با دانه بندی باز شامل خاکستر کف به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و از طرفی دیگر چون خاکستر کف زباله سوز حاوی مواد جاذب چربی است نیروی چسبندگی بین این ذرات و قیر افزایش یافته است، در نهایت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه آسفالت با دانه بندی باز حاوی خاکستر کف زباله سوز افزایش چشمگیری داشته است.[۲]



شکل ۳: مقاومت کششی غیر مستقیم و درصد خاکستر کف جایگزین [۲]

۳-۴-۶ آزمایش نسبت مقاومت کششی

به دلیل شرایط فیزیکی سطح آسفالت مانند رطوبت، دما، حجم ترافیک و آلودگی هوا نیروی چسبندگی بین قیر و ذرات شن و ماسه کاهش یافته و ساختار آسفالت را به سوی خرابی و ضعف سوق می‌دهد. شکل ۴ رابطه میان مقاومت کششی نسبی با مقدار خاکستر کف جایگزین را نشان می‌دهد. نتایج گویای آن است که تمامی نمونه‌های آسفالت با دانه بندی باز بالاتر از میزان استاندارد یعنی ۷۵٪ بوده است، بنابراین استفاده از خاکستر کف در آسفالت با دانه بندی باز به بهبود مقاومت در برابر نفوذ رطوبت در جاده کمک خواهدکرد.[۲]



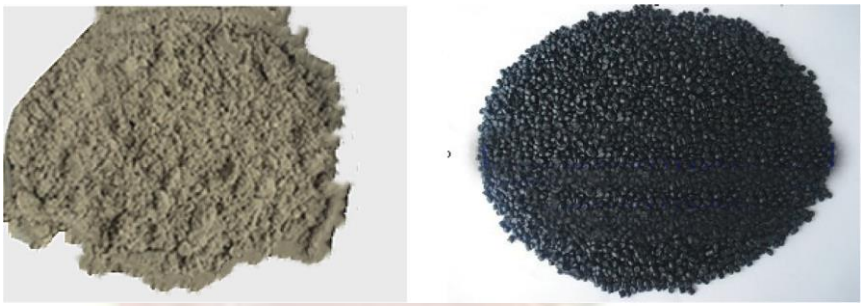
شکل ۴- مقاومت کششی نسبی با درصد خاکستر جایگزین[۲]

۵- ارزیابی ویژگی‌های ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله سوز

مطالعه بر روی ویژگی‌های ملات قیری جهت‌آشنایی بیشتر با اجرای روسازی بسیار ضروری است. در این تحقیق، تست آبشستگی انجام گرفته بر روی ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری نشان داد که این فرآیند می‌تواند موادی را بدون خطرات زیاد برای محیط زیست فراهم کند.[۳] همچنین مشخصات ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله سوزها که با فیلر سنگ آهک[۱۰] جایگزین شد مورد بررسی قرارگرفت. آزمایش ویسکوزیته، درجه نرمی، تست نفوذ، برش دینامیک رئومتر (سیال سنج)[۱۱]، اسکن میکروسکوپ الکترونی[۱۲] جهت ارزیابی اثرات خاکستر بادی زباله سوزهای جامد شهری بر ویژگی‌های ملات قیری انجام شده است [۳] خاکستر بادی زباله‌سوزها بسیار خطرناک است چون شامل فلزات سنگین سمی مانند جیوه و کادمیوم می‌باشد، مشخصات آبشستگی فلزات سنگین و ویژگی های ژئوتکنیکی خاکستر بادی تازه و کهنه زباله‌سوزها جهت استفاده به عنوان مصالح سنگی در ساختار بزرگراه‌ها بررسی‌شد و نتایج آزمایش نشان داد استفاده می‌توان از خاکستر بادی کهنه زباله‌سوزها در نقش مصالح سازه‌ای جاده امکان پذیر است. اخیرا تحقیقاتی منحصرا درزمینه‌ی به کار بردن خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری در قیر مورد توجه قرارگرفت،که اساسا بیشتر آن بر مخلوط قیری متمرکز شده است. مطالعاتی نیز توسط پژوهشگران در مورد استفاده مجدد از خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری به عنوان مصالح جایگزین با مصالح

[۱۰] Limestone mineral filler(LMF)
[۱۱] Dynamic shear rheometer(DSR)
[۱۲] Scaninig electron microscope

ریزدانه در مخلوط قیری داغ در سال‌های گذشته انجام شده است. تست فرایند آبشستگی مواد سمی[۱۳] بر روی مخلوط خاکستر بادی زباله-های بیمارستانی و قیر انجام و مشخص شد که قیر می تواند فلزات سنگین موجود در خاکستر بادی را در خود حبس کند. [۳] باتوجه به استفاده از فیلر در قیر، جایگزینی زباله‌های جامد شهری در مخلوط قیری می‌تواند به حفظ منابع با ارزش طبیعی مانند ماسه و سنگ کمک کند و اگر به طور وسیع در روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرارگیرد می‌توان به کاهش هزینه‌ها، کمتر شدن محل دفن زباله و اثرات مثبت زیست محیطی کمک کرد.



ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله سوز　　نمونه خاکستر بادی زباله سوز

شکل ۵ : نمونه خاکستر قبل و بعد از اختلاط با قیر

۵-۱ آزمایش ها و نتایج آن

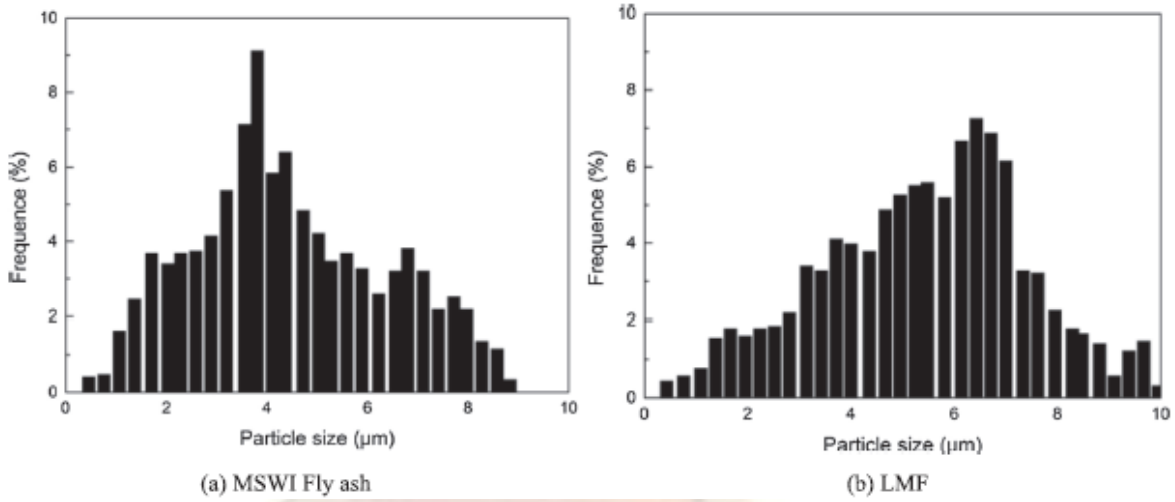
در این تحقیق سه نوع ماده مورد بررسی قرار گرفت: قیر، فیلر سنگ آهک و خاکستر بادی زباله های جامد شهری، قیر حاصل از نفت خام با درجه نفوذ ۷۰-۶۰# (درجه نفوذ قیر از ۶۰ تا ۷۰) ، به عنوان قیر اساس جهت تهیه ملات قیری مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات فیزیکی قیر در جدول ۶ تهیه شده است .[۳]

جدول ۶ : مشخصات قیر۷۰-۶۰[۳]

مشخصات	مقدار اندازه گیری
درجه نفوذ (۲۵ درجه، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه)۰/۱ میلی متر	۷۱/۷
درجه نرمی(درجه سانتی‌گراد)	۴۷/۱
قابلیت کشش(۱۵ درجه، ۵ سانتی‌متر بردقیقه) / سانتی متر	>۱۵۰
ویسکوزیته در ۶۰ درجه سانتی‌گراد (پاسکال در ثانیه)	۲۱۱/۳
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (پاسکال در ثانیه)	۴۳۵

درآزمایش چشمی دو نوع پودر (فیلر سنگ آهک و خاکستر بادی زباله سوز) بعد از خشک کردن نشان داده شد که ذرات خاکستر بادی زباله سوز اندکی از ذرات سنگ آهک کوچک‌ترهستند و نیز پراکندگی این دو ذره که با استفاده از لیزر انجام شده و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

[۱۳] Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)



شکل۶ : پراکندگی ذرات خاکستر بادی(a) و فیلر سنگ آهک(b) [۳]

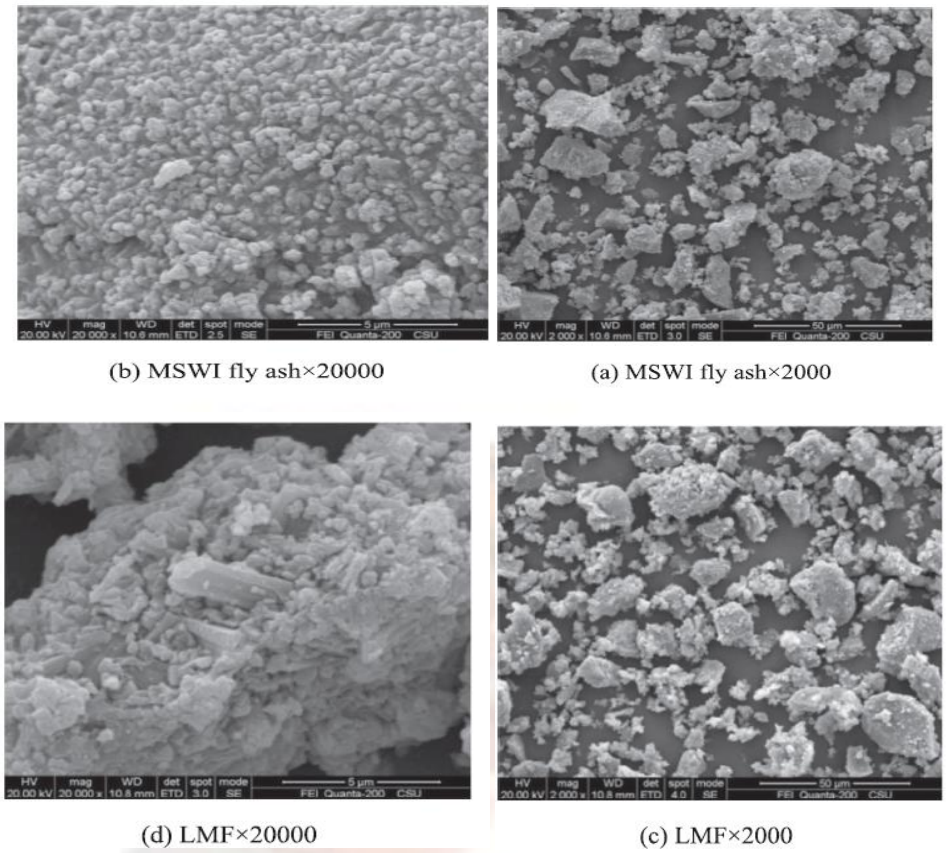
در ادامه ارائه وزن مخصوص، ضریب هیدرو فیلیک [۱۴] و سطح مقطع ویژه فیلر سنگ آهک و خاکستر بادی در جدول ۷ نشان داده شده است و مشخص شد وزن مخصوص و ضریب هیدروفیلیک خاکستر بادی از فیلر سنگ آهک کمتر بوده است. خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری دارای تخلخل بیشتر و چسبندگی بین خاکستر بادی و قیر در لایه آستر به دلیل کوچک‌تر بودن ضریب هیدروفیلیک بسیار قوی‌تر است. علاوه بر این سطح مقطع ویژه خاکستر بادی۴/۷ برابر بزرگ‌تر از فیلر سنگ آهک می‌باشد که خود نشان دهنده این است سطح تماس بین خاکستر بادی و قیر آستر، بیشتراز فیلر سنگ آهک می باشد. بنابراین ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله های جامد شهری نیروی چسبندگی بالایی دارد.

جدول ۷ : مشخصات فیزیکی خاکستر بادی زباله سوز و فیلر سنگ آهک[۳]

آزمایش	خاکستر بادی	فیلر سنگ آهک
وزن مخصوص	۲.۲۸۴	۲/۷۹۱
ضریب هیدروفیلیک	۰/۶۵	۰/۸۰
سطح مقطع ویژه	۶/۴۸	۱/۳۹

اسکن میکروسکوپ الکترونی که جهت مشاهده ویژگی های بافت شناسی خاکستر بادی زباله سوزهای جامد شهری و فیلر سنگ آهک به کار برده شده است ونتایج حاصل از آن در شکل ۶ نمایان شده است.

[۱۴] Hydrophilic factor



شکل۶: تصاویر a و b خاکستر بادی با ۲۰۰۰ و ۲۰۰۰۰برابر بزرگنمایی و تصاویر c و d فیلر سنگ آهک با همان اندازه بزرگنمایی[۳]

باتوجه به تصاویر واضح است که سطح هر دو ماده زبر و ناهموار بوده که در فرآیند جذب سطحی موثر بوده اما ذرات خاکستر بادی زباله سوزهای جامد شهری از فیلر سنگ آهک متقارن‌تر بوده است. علاوه بر این اندازه ذرات خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری از فیلر سنگ آهک بسیار کوچکتر است و نیز ساختار متخلخل ذرات خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری بسیار واضح تر است. عناصر سازنده فیلر سنگ آهک و خاکستر بادی زباله سوزهای جامد شهری که توسط دستگاه طیف سنج اَتمی آزمایش شده، حاوی مقادیر بالایی ازکلسیم، آلومینیوم و سیلیسیم بوده اما خاکستر بادی زباله‌سوزهای جامد شهری حاوی مقادیر بالایی از فلزات سنگین مانند نیکل، کادمیم، سرب، روی و باریم می‌باشد و برای محیط زیست نیز بسیار مضر است.

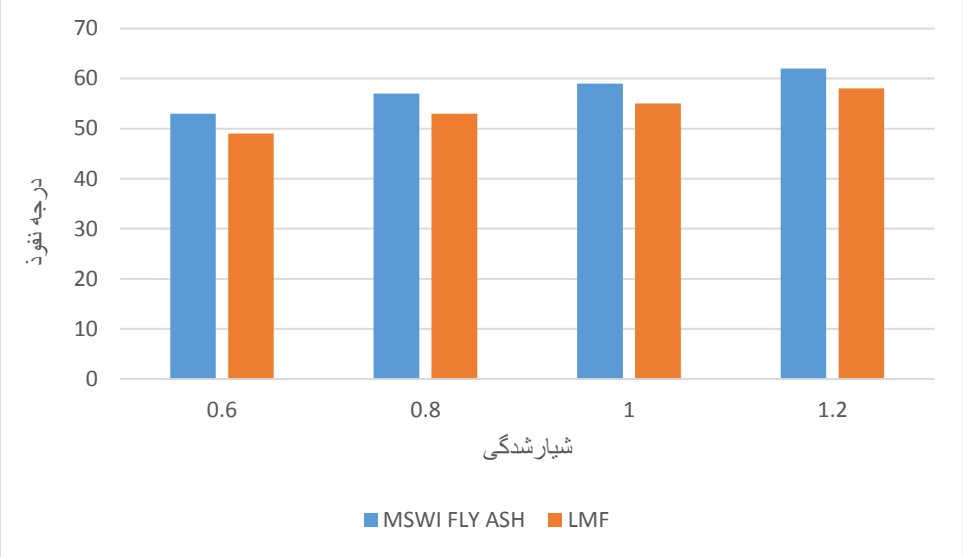
۲-۵ آزمایش نفوذ

نفوذ ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله سوزها و ملات قیری حاوی فیلر سنگ آهک با نسبت های متفاوت وزنی فیلر□قیر[۱۵] در شکل ۸ نشان داده شده است. در نمودار ۸ مشخص است مقدار نفوذ با اضافه کردن هر دو ماده کاهش یافته است. اما تاثیر خاکستر بادی زباله سوزها در کاهش نفوذ کمتر از ملات قیری حاوی فیلرسنگ آهک است در زمانی که نسبت فیلر به قیر ۱/۲بوده است.[۳] در نهایت اضافه کردن هر دو ماده می‌تواند قابلیت قیر را در برابر تغیر شکل ناشی از مقاومت برشی افزایش دهد.

[۱۵] *Filler/ Bitumen(F/B)*

۵-۳ آزمایش نقطه نرمی

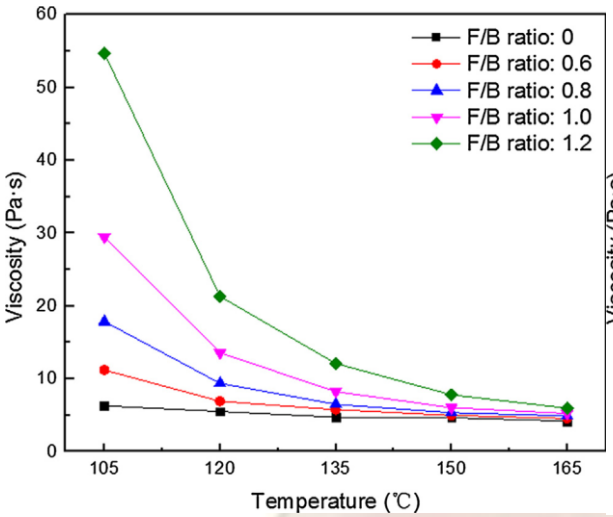
تاثیر نسبت فیلر به قیر در نقطه نرمی ملات قیری در شکل ۹ نشان داده شده است. نقطه نرمی به تدریج با افزایش مقدار فیلر افزایش یافته است. افزایش نقطه نرمی ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله‌سوزها بیشتر از ملات قیری حاوی سنگ آهک است. به علاوه میزان افـزایش نقطه نرمی در حدود ۵/۶۵٪ تا ۸/۰۵٪ بوده است و زمانی به بالاترین مقدار رسیده که نسبت فیلر به قیر ۰/۸٪ شـده اسـت. خاکسـتر بـادی زباله‌سوزها نقطه نرمی بالا و نیز مقاومت نسبتاً بهتری در برابر تغییر شکل ناشی در دماهای بالا داشته است.[۳]،[۸]



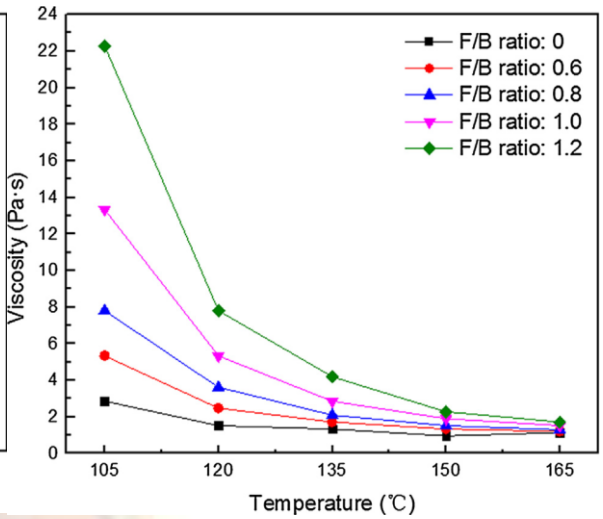
شکل۷: درجه نفوذ ملات قیری[۳]

۵-۴ مشخصات ویسکوزیته

ویسکوزیته ملات قیری عامل مهمی است که قابلیت عدم شکل پذیری مخلوط قیری را در تغییرشکل در دماهای بالا افزایش مـی‌دهـد. بـالا رفتن ویسکوزیته ملات قیری برابر است با عدم تغییر شکل مخلوط قیری و مقاومت بهتر شیارشدگی در جاده را نشـان داده اسـت. آزمـایش ویسکوزیته بروکفیلد برای ملات قیری شامل خاکستر بادی زباله‌سوزها و فیلر سنگ آهک در شکل ۱۰ و ۱۱نشان داده شـده‌اسـت. پرواضـح است که ویسکوزیته هر دو ملات قیری به نسبت معین فیلر به قیر افزایش یافته اما با افـزایش دمـا بتـدریج کـاهش یافتـه اسـت. بـه عـلاوه ویسکوزیته ملات قیری خاکستر بادی زباله‌سوزها بیشتر از ملات قیری حاوی فیلر سنگ آهک با همان نسبت مشابه فیلـر بـه قیـردر دمـای یکسان بوده است. برای مثال ملات قیری با میزان فیلر به قیر۰/۸ در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گرادرا در نظربگیرید، ویسکوزیته مـلات قیـری حاوی خاکستر بادی زباله‌سوز ۱۷/۸۸۳پاسکال و ویسکوزیته ملات قیری حاوی فیلر سنگ آهک ۷/۸۱۰پاسکال بوده است. این مطلب نشـان داد که اضافه کردن خاکستر بادی زباله‌سوز به طور قابل توجهی ویسکوزیته ملات قیری را در مقایسه با فیلر سنگ آهک افزایش داده اسـت. [۳]



شکل۸: خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری



شکل۹: فیلر سنگ آهک

۶- نتایج

این پژوهش به منظور بررسی امکان استفاده از خاکستر کف زباله‌سوز در روسازی‌های آسفالتی و ارزیابی ویژگی‌های ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله سوز و نیز مقایسه این دو صورت گرفته است. بدین منظور نتایج ذیل حاصل و ارائه شده است:

۱- خاکستر کف زباله سوز به علت تخلخل بالای ذرات آن وزن مخصوص کمتری دارد و زبری سطح روسازی آسفالتی را افزایش داده که در نهایت باعث افزایش اصطکاک در روسازی می‌شود. همچنین شیارشدگی روسازی آسفالتی با دانه بندی باز با جایگزین کردن خاکستر کف زباله سوز با مصالح ریزدانه بهبود یافته است.

۲- مقدار قیر بهینه زمانی که مقدار خاکستر کف زباله سوز جایگزین کمتر از ۶۰٪ باشد تا ۰/۱٪ افزایش یافته است. با توجه به این مطلب استفاده از آسفالت با دانه بندی باز حاوی خاکستر کف زباله سوز از جنبه مالی قابل توجیه است.

۳- از آن جایی که خاکستر کف زباله سوز حاوی مقادیر زیادی کلسیم نسبت به مصالح ریزدانه معمولی است و همچنین جذب کننده روغن است در نتیجه نیروی چسبندگی بین خاکستر کف زباله سوز و قیر افزایش و نهایتاً مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت بادانه بندی باز نیز افزایش یافته است.

۴- نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی و استاتیکی نشان داده که خواص آسفالت با دانه بندی باز حاوی خاکستر کف زباله سوز بهتر از آسفالت با مصالح ریزدانه معمولی است و خاکستر کف جایگزین بایستی کمتر از ۸۰٪ در آسفالت با دانه بندی باز مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در مورد ملات قیری حاوی خاکستر بادی زباله سوز نتایج آن به شرح ذیل است:

۱-خاکستر بادی زباله سوز به دلیل ذرات ریزدانه، ساختار متخلخل گسترده و سطح تماس بالا می تواند به عنوان فیلر در ملات قیری مورد استفاده قرار گیرد.

۲ - افزودن خاکستر بادی زباله سوز به قیر موجب کاهش درجه نفوذ، افزایش درجه نرمی و افزایش ویسکوزیته می‌شود.

۳-افزودن خاکستر بادی زباله‌سوز باعث افزایش مقدار سفتی و ازاین رو کاهش نرخ خزش در دماهای پایین می‌شود. آزمایشات اخیر ثابت کرده است خاکستر بادی در دماهای پایین و بالا تاثیرات منفی بر ملات قیری دارد. اما در نهایت نیز با مقایسه داده‌های آزمایشی، این نتیجه حاصل شده که بهترین مقدار جایگزین برای خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری ۷۵٪ در مخلوط آسفالتی است، علاوه بر آن آزمایش های فیزیکی و مکانیکی عملکرد نمونه‌هایی که خاکستر بادی به آنها اضافه شده نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آسفالت با طرح اختلاط جدید از آسفالت معمولی بهتر است و خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری می‌تواند به عنوان فیلر در آسفالت مورد استفاده قرار گیرد.

۷- پیشنهادات

بر اساس تحقیقات و یافته‌های مذکور، به نظر می‌رسد خاکستر بادی زباله‌های جامد شهری در دماهای بالا کارایی مناسب ندارد و خطرات ناشی از پخش شدن این خاکسترها در حین اختلاط با قیر و نیز مقادیر ناچیز درمقایسه با خاکستر کف زباله سوز و دیگر عوامل پیشنهاد می‌شود در ساخت آسفالت ازخاکستر کف زباله سوزهای جامد شهری استفاده شود چون عملکرد بهتری در آسفالت دارد.

منابع

[۱] agha beykie,ebrahim. (۱۳۹۱).technologies of using municipal solid waste incinerator ash .The ۶th national and ۱th national conference waste management.

[۲] lin Luo.Huan. (۲۰۱۷).Use of incinerator bottom ash in open graded asphalt concrete.Construction and building materials, ۱۴۹, Page(۴۹۷-۵۰۶).

[۳]kezhan,yan. (۲۰۱۹).Research on properties of bitumen mortar containing municipal solid waste incineration fly ash. Construction and building materials,۲۱۸ (۲۰۱۹), Page(۶۵۷-۶۶۶).

[۴] arshasbi , razieh. (۱۳۹۰).Utilization of incinerator ash,Tehran:The ۵th national conference and exhibition on environmental engineering.

[۵]fenkis recycingmaatschappi.(۱۹۹۴)The use of mswi bottom ash in asphalt concrete.The netherlands:Environmental aspects of construction with waste materials , Page(۸۵۱-۸۶۰).

[۶]. chui-te chiu.(۲۰۰۹).Evaluation of environmental impacts of asphalt mixtures containing municipal solid waste incinerator bottom ash,j environ.eng.manage. ۱۹(۲۰۰۹), Page(۱۲۷-۱۳۳).

[۷]vaitkus,audrius. (۲۰۱۸).Potential of mswi bottom ash to be used as aggregate in road building materials.The Baltic journal of road and bridge engineering,۱۳ (۱), Page(۷۷-۸۶).

[۸],zhi,luliang. (۲۰۱۵).A new solidification technology of municipal solid waste incineration fly ash and its application in asphalt mixture . In:۲nd international workshop on materials engineering and computer sciences. China.