

## بررسی تأثیر خاکستر لجن فاضلاب بر خواص فیزیکی و رئولوژیک قیر

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

امیرمحمد رمضانپور، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

یوسف امجدیان\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: yousef.amjadian@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

### چکیده

در این مطالعه، خواص فیزیکی و رئولوژیک قیر حاوی درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، خاکستر حاصل از سوزاندن لجن فاضلاب در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  به عنوان ماده افزودنی به قیر در مقادیر صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی خواص فیزیکی و رئولوژیک نمونه‌های مختلف، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری، ویسکوزیته چرخشی، رئومتر برش دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، درجه نفوذ و مقدار شکل‌پذیری قیر کاهش و نقطه نرمی افزایش می‌یابد. افزودن خاکستر لجن فاضلاب، ویسکوزیته چرخشی قیر را افزایش می‌دهد. اما با این حال، از مقدار مجاز ۳ پاسکال. ثانیه بسیار کمتر است. نتایج آزمایش برش دینامیک نشان داد که افزودن خاکستر لجن فاضلاب به قیر، مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش و عمر خستگی را کاهش می‌دهد. همچنین، افزودن خاکستر لجن فاضلاب، پتانسیل وقوع ترک‌های برودتی را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خاکستر لجن فاضلاب، خواص فیزیکی قیر، مقاومت در برابر شیارشدگی، عمر خستگی، ترک‌های برودتی

### ۱. مقدمه

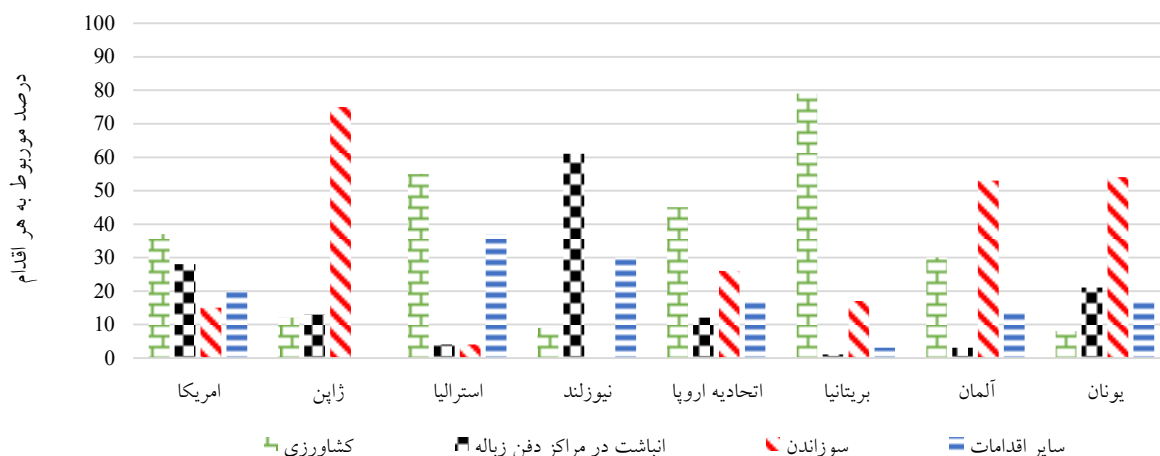
که برای محیط‌زیست خطری ندارد، اشاره کرد (چن و همکاران، ۲۰۱۶). در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، به هنگام تصفیه، مقادیر نسبتاً زیادی لجن جامد باقی می‌ماند. تا سال ۱۹۹۲، حدود ۵/۵ میلیون تن لجن خشک حاصل از تصفیه فاضلاب در اروپا تولید شده است (سبزلک و همکاران، ۲۰۱۸). این مقدار تولید لجن خشک در اروپا تا سال ۲۰۱۰ به ۱۰ میلیون تن رسیده و پیش‌بینی

امروزه، مدیریت لجن فاضلاب یک موضوع بسیار مهم است. در چند سال اخیر در اروپا، روش بازیافت و استفاده مجدد از مواد دورریز جایگزین انباشت آن شده است (سبزلک و همکاران، ۲۰۱۵). به آب خروجی از منازل مسکونی، مراکز پزشکی و تجاری، کارخانه‌های تولیدی و آب باران، فاضلاب گفته می‌شود. از اهداف مهم تصفیه فاضلاب، می‌توان به تولید آب قابل مصرف،

فلزات سنگین در آن، از جمله روی (Zn)، مس (Cu)، نیکل (Ni)، کادمیم (Cd)، سرب (Pb)، جیوه (Hg) و کروم (Cr)، تأثیرات بسیار منفی بر گیاهان و خاک زمین کشاورزی گذاشته و مانع استفاده از این لجن در کشاورزی شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۰). سوزاندن می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از لجن فاضلاب در کشاورزی و یا انباشت آن باشد که خروجی این روش مقادیر قابل توجهی خاکستر است (دوناتلو و چیزمن، ۲۰۱۳؛ مارتینز و همکاران ۲۰۱۲). شکل ۱، روش‌هایی را که در برخی از کشورها برای کنترل لجن فاضلاب استفاده می‌شود، نشان می‌دهد (کریستودولو و استامتلو، ۲۰۱۵).

شده که تا سال ۲۰۲۰ به ۱۳ میلیون تن خواهد رسید (گاریدو و همکاران، ۲۰۱۵).

چند دهه پیش، لجن فاضلاب، در مراکز دفن زباله انباشت شده و یا در دریا رها می‌شد. لجن فاضلاب حاوی دو دسته مواد آلاینده است: فلزات سنگین و گروه‌های خاصی از مواد آروگانیک. مشکلاتی که در دورریختن لجن فاضلاب وجود دارد عبارتند از کمبود زمین برای دفن لجن، آلودگی آب‌های زیرزمینی و آلودگی آب دریا، انتشار بوی بد و همچنین آلودگی خاک (ریزاردینی و همکاران، ۲۰۱۴). وجود نیتروژن و فسفر فراوان در لجن فاضلاب، این ماده را به یک کود بسیار غنی برای کشاورزی تبدیل کرده است. اما غلظت



شکل ۱. اقدامات مربوط به کنترل لجن فاضلاب در برخی کشورها (کریستودولو و استامتلو، ۲۰۱۵)

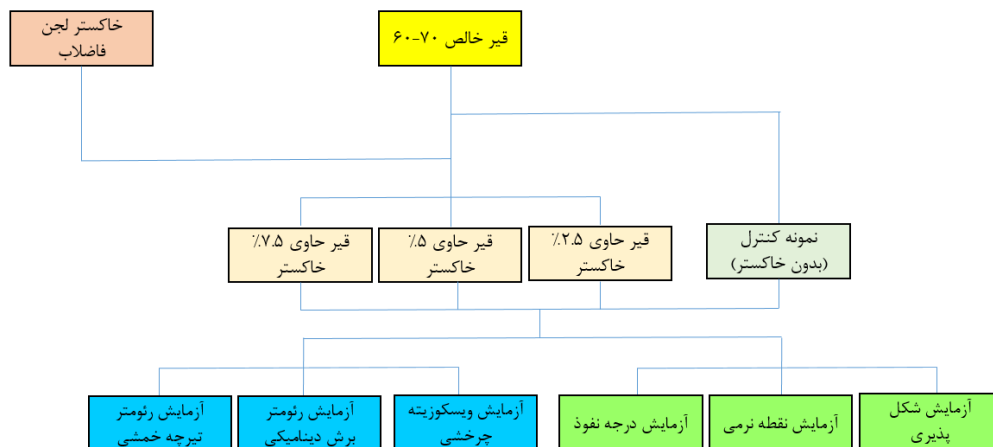
خام نشان می‌دهد که افزودن خاکستر به آجر خام سبب کاهش مقاومت و افزایش جذب آب آجر می‌شود (دورانت و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، امکان تهیه سنگدانه سبک از خاکستر لجن فاضلاب بررسی شده که نتایج آزمایش‌ها تا حدودی موفقیت‌آمیز بوده است (چیزمن و وردی، ۲۰۰۵).

همچنین، محققین حوزه قیر و آسفالت، تحقیقاتی در خصوص امکان استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در تولید مخلوط آسفالتی انجام داده‌اند. نتایج یکی از مطالعات نشان داده که نمونه مخلوط آسفالتی حاوی

در چند سال اخیر، محققین به بررسی کاربرد خاکستر لجن فاضلاب در تولید مصالح ساختمانی پرداخته‌اند (دوناتلو و چیزمن، ۲۰۱۳). محققین مختلف به بررسی تأثیر استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در تولید ملات سیمانی و بتن پرداخته‌اند که نتایج کار آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش درصد خاکستر، کارایی و مقاومت بتن و ملات سیمانی کاهش می‌یابد (چانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لین و همکاران، ۲۰۱۵؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۲). تحقیقات انجام شده در خصوص بررسی تأثیر خاکستر لجن فاضلاب روی خواص آجر

با بررسی پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که اغلب مطالعات در محدوده بررسی تأثیر خاکستر لجن فاضلاب بر مخلوط آسفالتی بوده و مطالعات چندانی در خصوص استفاده از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان ماده افزودنی به قیر انجام نشده است. این مطالعه به دنبال آن است که خواص قیر حاوی خاکستر لجن فاضلاب را بررسی کند. لذا، نمونه‌های قیر حاوی مقادیر صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد از خاکستر لجن فاضلاب تهیه شده و آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری، ویسکوزیته چرخشی، رئومتر برش دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی انجام شد. شکل ۲، فلوجارت برنامه آزمایشگاهی مربوط به این پژوهش را نشان می‌دهد.

خاکستر لجن فاضلاب نسبت به نمونه کنترل فاقد خاکستر، مقاومت مارشال کمتر و عدد روانی بیشتری دارد (السید و همکاران، ۱۹۹۵). مطالعه دیگری اعلام کرده که استفاده از ۲٪ وزنی خاکستر لجن فاضلاب (نسبت به کل سنگدانه‌ها) در مخلوط آسفالتی، فاقد تأثیر منفی بر خواص شیارشدگی و خستگی است (شیروودکار و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، محققین اعلام کردند که نمونه‌های حاوی ۲ تا ۳ درصد خاکستر لجن فاضلاب حساسیت رطوبتی قابل قبولی دارند. اما مقاومت در برابر شیارشدگی و مدول برجهدگی این نمونه‌ها کمتر از نمونه کنترل است (تنزا و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعه دیگری نشان داده که با افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب، مقاومت مارشال ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد (قضاوی و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۲. فلوجارت برنامه آزمایشگاهی

ذرات نسبتاً درشت و دارای بافت متخلخل باقی می‌ماند. بعد از خرد کردن لجن سوزانده شده، ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ به عنوان ماده افزودنی قیر استفاده شد. نحوه اختلاط قیر با خاکستر لجن به این صورت بوده که ابتدا قیر خالص تا دمای  $160^{\circ}\text{C}$  گرم شده و سپس خاکستر لجن فاضلاب در مقادیر وزنی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد به قیر خالص اضافه و عملیات اختلاط به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه انجام گرفت.

## ۲. مصالح و مواد

در این پژوهش، از قیر خالص ۶۰-۷۰ با مشخصات فیزیکی مطابق جدول ۱ استفاده شد. برای تهیه خاکستر لجن فاضلاب، لجن فاضلاب تهیه شده از تصفیه‌خانه جنوب تهران در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  سوزانده شد. شکل ۳، لجن فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب تهران و خاکستر حاصل از سوزاندن آن را نشان می‌دهد. جدول ۲، مشخصات شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب را نشان می‌دهد. پس از سوزاندن لجن، مواد باقیمانده به صورت



شکل ۳. لجن فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب تهران و خاکستر حاصل از سوزاندن آن

از روش<sup>۱</sup> RTFO به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر در طول فرایند اختلاط، حمل و تراکم مخلوط آسفالتی، بر اساس استاندارد ASTM D2872-12e استفاده شد. در این روش، از نمونه‌های مختلف قیر با درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب، ۸ نمونه به وزن ۳۵ گرم جدا و در بطری‌های مجزا ریخته شد. سپس بطری‌ها در دستگاه RTFO قرار گرفته و تحت دمای  $163^{\circ}\text{C}$  با سرعت ۱۵ دور در دقیقه به مدت ۴۵ دقیقه چرخانده شد.

از روش<sup>۲</sup> PAV به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت قیر در طول مدت بهره‌برداری بر اساس استاندارد ASTM D6521-13 استفاده شد. در این روش، نمونه‌های قیر RTFO، به وزن ۵۰ گرم، در سینی‌های مخصوص ریخته شدند. به منظور ایجاد پیرشدگی بلندمدت در قیر، سینی‌های حاوی قیر RTFO با درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب در دستگاه PAV تحت فشار ۲/۱ مگاپاسکال و دمای  $100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰ ساعت قرار داده شدند. سپس، برای آزادسازی هوای محبوس در قیر، هر یک از نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای  $163^{\circ}\text{C}$  در گرمخانه قرار داده شدند.

۱- Rolling Thin Film Oven

۲- Pressure Aging Vessel

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۵ درجه سلسیوس
درجه نفوذ در دمای ۲۵ °C	ASTM D5	۶۸ دسی میلی متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۷ درجه سلسیوس
شکل پذیری در دمای ۲۵ °C	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی متر
چگالی	ASTM D70	۱/۰۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب
$G^*/\sin\delta$ قیر پیر نشده در دمای ۶۴ °C	ASTM D7175-15	۱/۱۲ کیلوپاسکال
$G^*/\sin\delta$ قیر RTFO در دمای ۶۴ °C	ASTM D7175-15	۲/۳۲ کیلوپاسکال
$G^*. \sin\delta$ در دمای ۲۵ °C	ASTM D7175-15	۱۷۸۰ کیلوپاسکال
سختی خزشی در دمای ۱۲ °C-	AASHTO M 320	۹۷/۱۲ مگاپاسکال
مقدار m در دمای ۱۲ °C-	AASHTO M 320	۰/۳۰۱

جدول ۲ مشخصات شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب تصفیه خانه جنوب

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cl	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI <sup>1</sup>
۳۰/۷۴	۴/۹۷	۲/۸۱	۱۸/۷۹	۲/۵۳	۰/۶۸	۰/۶۲	۱۶/۹۹	۱۰/۱۸	۱۰/۶۰	۱/۰۹

۱- Loss on Ignition

### ۳. آزمایش‌ها

#### ۳-۱. آزمایش درجه نفوذ

آزمایش درجه نفوذ براساس استاندارد ASTM D5/D5M-3 روی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب در دمای °C ۲۵ انجام شد.

#### ۳-۲. آزمایش نقطه نرمی

این آزمایش براساس استاندارد ASTM D36/D36M-14e1 انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌های مختلف درون حلقه فلزی ریخته و تحت وزن گلوله‌های فلزی ۳/۵ گرمی به تدریج گرمادهی شدند. در نهایت، دمایی که در آن گلوله‌های فلزی به سطح تیغه فلزی زیرین در فاصله ۲۵ میلی‌متری رسیدند به عنوان دمای نقطه نرمی گزارش شد.

#### ۳-۳. آزمایش شکل‌پذیری قیر

آزمایش شکل‌پذیری قیر بر اساس استاندارد ASTM D113-07 به منظور بررسی پتانسیل ترک خوردگی قیر در دمای کم و میزان چسبندگی آن انجام می‌شود (جفری و همکاران، ۲۰۱۸). در این آزمایش، انواع نمونه‌ها در حمام آب °C ۲۵ با سرعت ۵ سانتی‌متر در دقیقه کشیده شده و میزان تغییر طول در زمان گسیختگی اندازه گرفته شد.

#### ۳-۴. آزمایش ویسکوزیته چرخشی ( $RV^1$ )

آزمایش ویسکوزیته چرخشی برای تعیین میزان مقاومت قیر در برابر جاری شدن بر اساس استاندارد ASTM D4402 اندازه‌گیری شد. آزمایش تعیین ویسکوزیته از آن جهت حائز اهمیت بوده که به کمک آن می‌توان دمای مناسب قیر را برای رسیدن به کارایی مطلوب در مرحله ساخت و تراکم مخلوط آسفالتی تعیین کرد. بر اساس استاندارد AASHTO M 320، یکی از شروط

قابل استفاده بودن قیر برای ساخت مخلوط آسفالتی، داشتن ویسکوزیته چرخشی کمتر از ۳ پاسکال. ثانیه در دمای °C ۱۳۵ است. لذا، در این پژوهش، دمای °C ۱۳۵ به عنوان دمای انجام آزمایش برای انواع نمونه‌ها انتخاب شد.

#### ۳-۵. آزمایش رئومتر برش دینامیک ( $DSR^2$ )

به منظور بررسی خواص رئولوژیک قیر، آزمایش DSR بر اساس استاندارد ASTM D7175-15 انجام می‌شود. در این آزمایش، رفتار ویسکوالاستیک قیر به کمک دو پارامتر مدول مختلط  $G^*$  و اختلاف فاز  $\delta$  تعیین می‌شود که بعد از تعیین این دو پارامتر، می‌توان پتانسیل شیارشدگی و ترک‌های خستگی را به ترتیب به کمک پارامترهای  $G^*/\sin\delta$  و  $G^*.\sin\delta$  تعیین کرد. برای بررسی پتانسیل شیارشدگی، نمونه‌های قیر جوان و قیر RTFO به ضخامت ۱ میلی‌متر در صفحه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر و برای بررسی ترک‌های خستگی، نمونه‌های قیر PAV به ضخامت ۲ میلی‌متر در صفحه‌ای به قطر ۸ میلی‌متر تحت فرکانس ۱.۵۹ هرتز مورد آزمایش قرار گرفتند. مدول مختلط در واقع نشانگر سختی قیر بوده و با افزایش مقدار آن سختی قیر نیز افزایش می‌یابد. همچنین، کاهش مقدار اختلاف فاز نشانگر آن بوده که رفتار قیر بیشتر به رفتار الاستیک شباهت داشته و قابلیت برگشت به حالت اولیه به هنگام تغییر شکل و مقاومت در برابر خستگی را دارد. در نتیجه، می‌توان دریافت که با افزایش مقدار مدول مختلط و یا کاهش مقدار اختلاف فاز (افزایش پارامتر  $G^*/\sin\delta$ )، مقاومت قیر در برابر شیارشدگی افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش مقدار مدول مختلط و یا افزایش مقدار اختلاف فاز (افزایش پارامتر  $G^*.\sin\delta$ )، عمر خستگی قیر کاهش می‌یابد (الخطیب و رمضان، ۲۰۱۵).

همکاران، ۲۰۱۵). شکل ۴، تصویری از آزمایش رئومتر برش دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی را نشان می‌دهد.

#### ۴. نتایج و تحلیل داده‌ها

##### ۴-۱. آزمایش درجه نفوذ

آزمایش درجه نفوذ برای قیر پیر نشده با مقادیر مختلف (صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد) در دمای ۲۵ °C انجام شد که نتایج آن در شکل ۵ آورده شده است. بر اساس نتایج این آزمایش، با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقدار درجه نفوذ کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که با افزودن ۲/۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب به قیر، درجه نفوذ حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین، می‌توان دریافت که با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، نرخ کاهش درجه نفوذ نیز کم می‌شود.

##### ۳-۶. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR<sup>۱</sup>)

آزمایش BBR به منظور ارزیابی رفتار قیر در دمای کم انجام می‌شود (گریلی و همکاران، ۲۰۱۹). در این آزمایش، سختی خزشی (S(t)) و ظرفیت آزادسازی تنش<sup>۲</sup> (مقدار m)، شیب نمودار لگاریتم سختی- لگاریتم زمان، به کمک تیرچه قیری به ضخامت ۶/۴ میلی‌متر، پهنا ۱۲/۷ میلی‌متر و طول ۱۲۷ میلی‌متر تعیین می‌شود (استاندارد AASHTO T313). در این آزمایش، بار به وسط تیرچه قیری اعمال شده و در هر لحظه از زمان، مقدار تغییرشکل تیرچه ( $\delta(t)$ ) به کمک LVDT تعیین می‌شود. از آنجا که قیر ماده‌ای ویسکوالاستیک بوده، لذا مقدار تغییرشکل و در نتیجه سختی خزشی در هر لحظه متفاوت است. سختی خزشی برای تیرچه قیری مطابق رابطه (۱) است.

$$S(t) = \frac{P.L^3}{4.b.h^3.\delta(t)} \quad (1)$$

در این رابطه، P مقدار بار اعمالی، L طول و b و h پهنا و ضخامت تیرچه هستند.

همچنین، مقدار m طبق رابطه (۲) تعیین می‌شود. مقدار این پارامتر برای مواد ویسکوالاستیک بین صفر و یک بوده که برای ماده جامد الاستیک برابر یک و برای سیال ویسکوز برابر صفر است (گریلی و همکاران، ۲۰۱۹).

$$m(t) = \left| \frac{d \log(S(t))}{d \log(t)} \right| \quad (2)$$

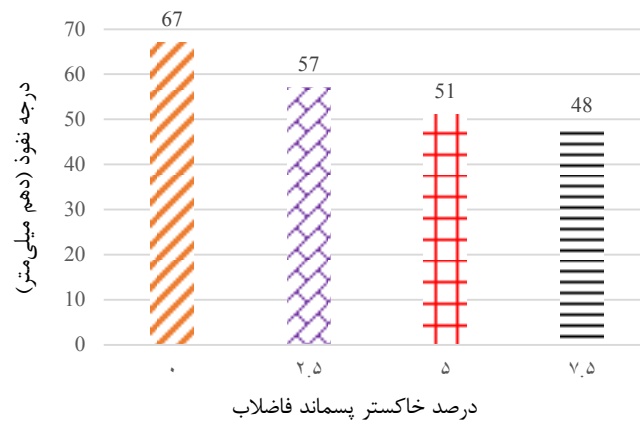
استاندارد AASHTO M 320، حداکثر مقدار قابل قبول سختی خزشی را برابر ۳۰۰ مگاپاسکال و حداقل مقدار m را برابر ۰/۳ اعلام کرده است. اگر مقدار سختی خزشی خیلی زیاد باشد، به معنای آن است که قیر در دماهای کم ترد و شکننده بوده و احتمال ترک‌خوردگی در آن زیاد است. از طرفی، زیاد بودن مقدار m به معنای زیاد بودن سرعت آزادسازی تنش در قیر بوده و پتانسیل ترک‌خوردگی در دمای کم را کاهش می‌دهد (هاتر و

۱- Bending Beam Rheometer

۲- Stress relaxation capacity (m-value)



شکل ۴. تصویر آزمایش‌های رئومتر برش دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی



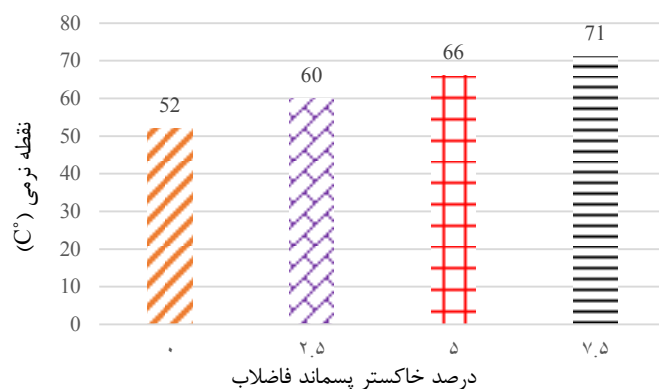
شکل ۵. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر درجه نفوذ قیر

خاکستر لجن فاضلاب چشم‌گیرتر از درصدهای زیادتر است. از آنجا که افزودن خاکستر لجن فاضلاب به قیر سبب افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود، می‌توان دریافت که قیر حاوی خاکستر لجن فاضلاب برای مناطق گرمسیر عملکرد بهتری خواهد داشت.

#### ۴-۲. آزمایش نقطه نرمی

برای هر درصد خاکستر لجن فاضلاب، دو نمونه تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش نقطه نرمی در شکل ۶ آورده شده است. بر اساس شکل ۶، با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، دمای مورد نیاز برای نرم شدن قیر و رسیدن گلوله فلزی به صفحه زیرین افزایش می‌یابد که مقدار افزایش دمای نقطه نرمی در درصد کم



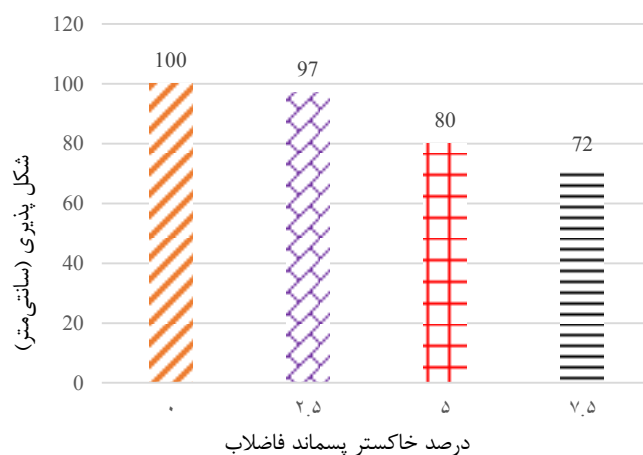


شکل ۶. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر نقطه نرمی قیر

خاکستر، مقدار شکل پذیری قیر افت نسبتاً چشم گیری داشت. نمونه حاوی ۵٪ خاکستر لجن فاضلاب ۲۰٪ و نمونه قیر حاوی ۷/۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب ۲۸٪ کمتر تغییر شکل داشته که در میان نمونه ها، کمترین میزان شکل پذیری را از خود نشان دادند. از آنجا که خاکستر لجن فاضلاب ماده ای جامد و سخت بوده، لذا افزودن این ماده به قیر منجر به افزایش سختی قیر و کاهش شکل پذیری آن می شود.

### ۳-۴. آزمایش شکل پذیری قیر

نتایج آزمایش شکل پذیری قیر در شکل ۷ آورده شده است. بعد از انجام آزمایش شکل پذیری مشخص شد که در نمونه قیر خالص، بعد از ۱۰۰ سانتی متر تغییر شکل، هیچ گونه پارگی ایجاد نشد. همچنین، نمونه قیر با ۲/۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب، شکل پذیری نسبتاً خوبی از خود نشان داده و در تغییر شکل ۹۷ سانتی متری گسیخته شد. اما در درصدهای بیشتر



شکل ۷. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر شکل پذیری قیر

ویسکوالاستیک قیر منجر به سخت شدن و کاهش شکل پذیری قیر می شود. در نتیجه، درجه نفوذ قیر کاهش می یابد. همچنین، برای روان شدن قیر حاوی خاکستر، انرژی بیشتری مورد نیاز بوده و نقطه نرمی قیر افزایش می یابد. از طرف دیگر، با کاهش شکل پذیری

خاکستر لجن فاضلاب به واسطه درصد زیاد سیلیس در آن ماده ای سخت بوده، همچنین، مقدار آهک موجود در خاکستر سبب می شود که میان ذرات جامد خاکستر و قیر اتصال فیزیکی برقرار شود. توزیع همگن ذرات جامد و سخت در ماده شکل پذیر و

اندکی افزایش می‌یابد و در محدوده ۰/۳۳ تا ۰/۳۷۲ پاسکال. ثانیه تغییر می‌کند. لذا، مقدار ویسکوزیته برای همه نمونه‌ها تفاوت چندانی نداشته و از مقدار مجاز ۳ پاسکال. ثانیه بسیار کمتر است. همانگونه که گفته شد، توزیع ذرات جامد و سخت خاکستر در ماده شکل‌پذیر و ویسکوالاستیک قیر منجر به کاهش شکل‌پذیری و سخت شدن قیر شده و در نتیجه در دمای ثابت، ویسکوزیته قیر حاوی خاکستر اندکی افزایش می‌یابد.

قیر، مقدار کش‌آمدگی آن نیز کاهش یافته و در طول کوتاه‌تری گسیخته می‌شود.

#### ۴-۴. آزمایش ویسکوزیته چرخشی

آزمایش ویسکوزیته چرخشی برای قیر پیر نشده در دمای ۱۳۵ °C انجام شد که نتایج آن در شکل ۸ آورده شده است. همانگونه که نتایج آزمایش نشان می‌دهد، با افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب، ویسکوزیته قیر



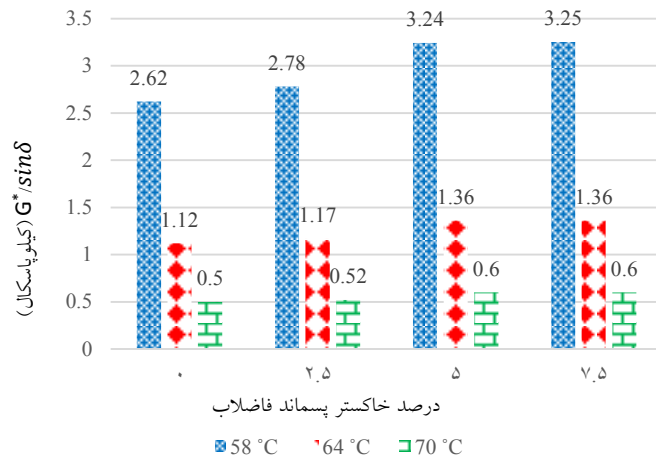
شکل ۸. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ °C

می‌توان دریافت که با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقدار  $G^*.sin\delta$  افزایش یافته که برای نمونه‌های حاوی ۲/۵ و ۵ درصد خاکستر، این افزایش بسیار کم و برای نمونه حاوی ۷/۵ درصد خاکستر بیشتر است. از آنجا که با افزایش مقدار  $G^*.sin\delta$ ، عمر خستگی قیر کاهش می‌یابد، لذا می‌توان دریافت که عمر خستگی نمونه حاوی ۲/۵ و ۵ درصد خاکستر نسبت به نمونه قیر خالص تفاوت چندانی نداشته، اما نمونه حاوی ۷/۵ درصد خاکستر کمترین مقدار عمر خستگی را در بین همه نمونه‌ها دارد. خاکستر نسبت به قیر بسیار سخت‌تر بوده و مقدار  $G^*$  آن بسیار بیشتر است. لذا، افزودن این ماده به قیر منجر به افزایش  $G^*$  کل شده و در نتیجه مقادیر  $G^*/sin\delta$  و  $G^*.sin\delta$  افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش عمر خستگی می‌شود.

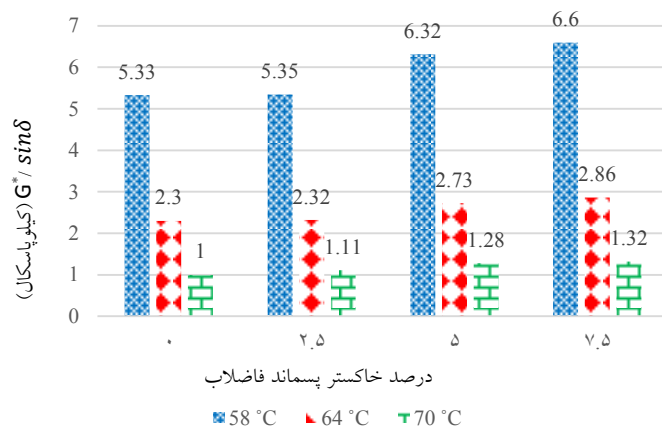
#### ۵-۵. آزمایش رئومتر برش دینامیک

مقادیر  $G^*/sin\delta$  به دست آمده از آزمایش رئومتر برش دینامیک برای قیر پیر نشده و قیر RTFO حاوی درصدهای مختلف خاکستر لجن فاضلاب در سه دمای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که در همه دماها، برای قیر پیر نشده و قیر RTFO، با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقدار  $G^*/sin\delta$  افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که افزودن خاکستر لجن فاضلاب به قیر، مقاومت قیر را در برابر شیارشدگی افزایش داده و استفاده از درصدهای بیشتر خاکستر لجن فاضلاب، این افزایش مقاومت را چشم‌گیرتر خواهد کرد.

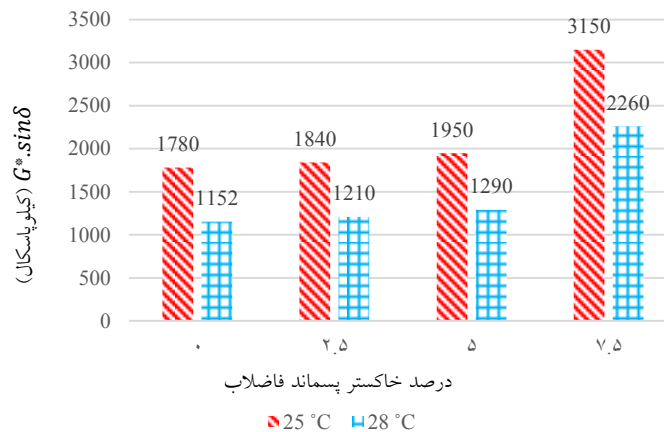
شکل ۱۱، مقادیر  $G^*.sin\delta$  را برای قیر PAV در دو دمای ۲۵ °C و ۲۸ °C نشان می‌دهد. از این نمودار



شکل ۹. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر مقدار  $G^*/\sin\delta$  برای قیر پیر نشده در دماهای زیاد



شکل ۱۰. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر مقدار  $G^*/\sin\delta$  برای قیر RTFO در دماهای زیاد



شکل ۱۱. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر مقدار  $G^*. \sin\delta$  برای قیر PAV در دماهای میانی

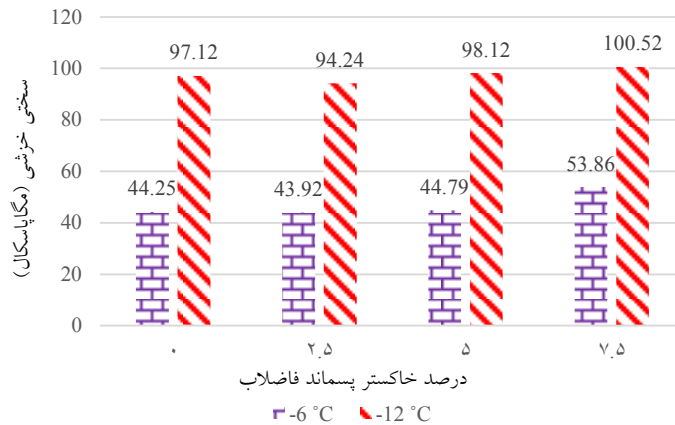
انجام شد که نتایج مربوط به سختی خزشی و مقدار  $m$  به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که در دو دمای  $6^\circ\text{C}$  و  $12^\circ\text{C}$ ، با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب،

#### ۶-۴. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

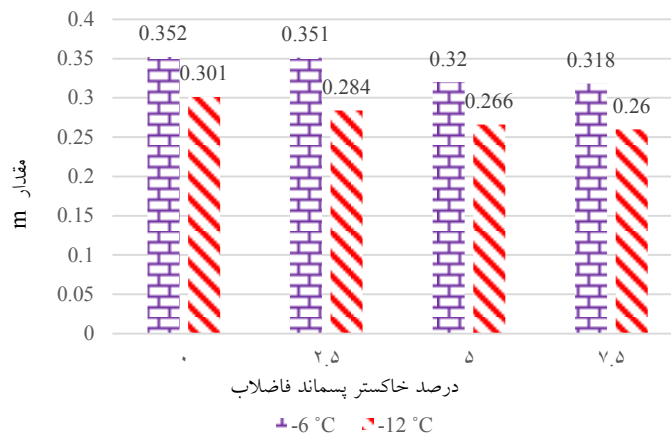
این آزمایش در دو دمای  $6^\circ\text{C}$  و  $12^\circ\text{C}$  روی قیر PAV با درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب

ظرفیت آزادسازی تنش در دماهای کم را در قیر کاهش داده و پتانسیل وقوع ترک‌های برودتی را افزایش می‌دهد. افزودن ماده جامد و شکننده (غیرقابل انعطاف) خاکستر به قیر منجر به کاهش شکل‌پذیری کل مخلوط شده و ظرفیت آزادسازی تنش کاهش می‌یابد. لذا، با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به قیر، پتانسیل وقوع ترک‌های برودتی افزایش می‌یابد.

مقدار سختی خزشی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته که مقدار این افزایش بسیار کم است. همچنین، مقدار  $m$  در دمای  $-6^{\circ}\text{C}$ ، با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، کاهش می‌یابد که با این حال مقدار آن از  $0/3$  بیشتر بوده، اما در دمای  $-12^{\circ}\text{C}$  مقدار آن در همه درصدهای خاکستر به کمتر از  $0/3$  می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن خاکستر لجن فاضلاب به قیر،



شکل ۱۲. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر سختی خزشی قیر PAV در دماهای کم



شکل ۱۳. تأثیر افزودن خاکستر لجن فاضلاب بر مقدار  $m$  در قیر PAV در دماهای کم

رئومتر برشی دینامیک برای قیر پیر نشده، قیر RTFO و قیر PAV و آزمایش رئومتر تیرچه خمشی برای قیر PAV انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که:

- با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، درجه نفوذ کاهش و نقطه نرمی افزایش می‌یابد که این موضوع بیانگر آن بود که خاکستر لجن فاضلاب منجر به سخت شدن قیر می‌شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، لجن فاضلاب حاصل از تصفیه‌خانه فاضلاب در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  سوزانده شده و خاکستر خرد شده به عنوان ماده افزودنی در مقادیر وزنی صفر،  $2/5$ ،  $5$  و  $7/5$  درصد به قیر خالص افزوده شد. روی نمونه‌های مختلف، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری، ویسکوزیته چرخشی برای نمونه پیر نشده،

- با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، شکل‌پذیری قیر کاهش می‌یابد. مقدار کاهش شکل‌پذیری برای ۲/۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب کم بوده و در درصدهای بیشتر، مقدار شکل‌پذیری افت بیشتری دارد.
  - با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، ویسکوزیته چرخشی قیر افزایش می‌یابد. این افزایش ویسکوزیته به اندازه‌ای نبوده که برای کارایی قیر مشکل‌آفرین باشد.
- مشابهی دارند. اما نمونه حاوی ۷/۵ درصد خاکستر، کمترین عمر خستگی را دارد.
  - با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، سختی خزشی قیر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین، ظرفیت آزادسازی تنش در دمای کم کاهش یافته و پتانسیل وقوع ترک‌های برودتی افزایش می‌یابد.

## ۶. تشکر و قدردانی

بدین وسیله از خانم مهندس فروتن و پرسنل محترم آزمایشگاه شرکت پالایش نفت جی به واسطه همکاری و حمایت همه جانبه ایشان کمال تشکر و قدردانی را داریم.

- با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقاومت قیر در برابر شیارشدگی افزایش می‌یابد.
- افزودن خاکستر لجن فاضلاب به قیر منجر به کاهش عمر خستگی قیر می‌شود. نمونه‌های حاوی صفر، ۲/۵ و ۵ درصد خاکستر، عمر خستگی تقریباً

## ۷. مراجع

- AASHTO Standard M 320-10. 2011. "Standard specification for performance-graded asphalt binders". American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2012. "Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)". AASHTO T313.
- Ahmed, H. K., Fawy, H. A. and Abdel-Hady, E. S. 2010. "Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil". Agric Biol. J. N. Am., 1(5): 1044-1049.
- Al Sayed, M. H., Madany, I. M. and Buali, A. R. M. 1995. "Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions". Constr. Build. Mater. 9(1): 19-23.
- Al-Khateeb, G. G. and Ramadan, K. Z. 2015. "Investigation of the effect of rubber on rheological properties of asphalt binders using superpave DSR". KSCE J. Civ. Eng., 19(1), 127-135.
- ASTM D2872-12e1. 2012. "Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test)". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D36. 2014. "Standard test method for softening point of bitumen (ring-and ball apparatus)". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D4402M-15. 1999. "Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D6521-13. 2013. "Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV)". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D7175. 2015. "Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM, D113. 2007. "Standard test method for ductility of bituminous materials". Annual Book of Standards.
- ASTM, D5. 2013. "Standard test method for penetration of bituminous materials". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- Chang, F. C., Lin, J. D., Tsai, C. C. and Wang, K. S. 2010. "Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash". *Water Sci. Technol.*, 62(7): 1689-1693.
- Cheeseman, C. R. and Viridi, G. S. 2005. "Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash". *Resour. Conserv. Recy.*, 45(1): 18-30.
- Chin, S. C., Ing, D. H., Kusbiantoro, A., Wong, Y. K. and Ahmad, S. W. 2016. "Characterization of sewage sludge ash (SSA) in cement mortar". *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, 11: 2242.
- Christodoulou, A. and Stamatelatou, K. 2015. "Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide". *Water Sci. Technol.*, 73(3): 453-462.
- Cieślak, B. M., Namieśnik, J. and Konieczka, P. 2015. "Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods". *J. Clean. Prod.*, 90: 1-15.
- Cieślak, B. M., Zając, M., Gałuszka, A. and Konieczka, P. 2018. "Comprehensive stabilization of all streams of solid residues formed during sewage sludge thermal treatment- Case study". *J. Clean. Prod.*, 178: 757-767.
- Donatello, S. and Cheeseman, C. R. 2013. "Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review". *Waste Manag.*, 33(11): 2328-2340.
- Durante Ingunza, M. P., Duarte, A. C. and Nascimento, R. M. 2011. "Use of sewage sludge as raw material in the manufacture of soft-mud bricks". *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(6): 852-856.
- Garilli, E., Autelitano, F. and Giuliani, F. 2019. "Use of bending beam rheometer test for rheological analysis of asphalt emulsion-cement mastics in cold in-place recycling". *Constr. Build. Mater.*, 222: 484-492.
- Garrido-Baserba, M., Molinos-Senante, M., Abelleira-Pereira, J. M., Fdez-Güelfo, L. A., Poch, M. and Hernández-Sancho, F. 2015. "Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems". *J. Clean. Prod.*, 107: 410-419.
- Ghazawi, Z., Khedaywi, T. and Gouneem, A. 2015. "Pollution reduction and reuse of sludge waste in asphalt paving mixtures". *Proceedings of the Fourth International Conference on Energy Systems, Environment, Entrepreneurship and Innovation*, pp. 395-400.
- Hunter, R. N., Self, A. and Read, J. 2015. "The shell bitumen handbook". ICE Publishing.
- Jamshidi, M., Jamshidi, A., Mehrdadi, N. and Pacheco-Torgal, F. 2012. "Mechanical performance and capillary water absorption of sewage sludge ash concrete (SSAC)". *Int. J. Sustain. Eng.*, 5(3): 228-234.
- Jeffry, S. N. A., Jaya, R. P., Hassan, N. A., Yaacob, H., Mirza, J. and Drahman, S. H. 2018. "Effects of nanocharcoal coconut-shell ash on the physical and rheological properties of bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 158: 1-10.
- Lynn, C. J., Dhir, R. K., Ghataora, G. S. and West, R. P. 2015. "Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete". *Constr. Build. Mater.*, 98: 767-779.
- Martínez-García, C., Eliche-Quesada, D., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F. J. and Corpas-Iglesias, F. A. 2012. "Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry". *J. Environ. Manag.*, 95: S343-S348.
- Rizzardini, C. and Goi, D. 2014. "Sustainability of domestic sewage sludge disposal". *Sustain.*, 6(5): 2424-2434.
- Shirodkar, P., Sonpal, K., Norton, A., Weaver, R., Tomlinson, C., Nolan, A. and Jahan, K. 2011. "Evaluation of fatigue and rutting performance of sewage sludge ash (SSA) in asphalt concrete". *J. Solid Waste Technol. Manag.*, 37(1): 55-60.

Tenza-Abril, A. J., Saval, J. M. and Cuenca, A. 2015. "Using sewage-sludge ash as filler in bituminous mixes". J. Mater. Civ. Eng., 27(4): 04014141.