مقایسه‌ی عملکرد آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی طبیعی و سنگدانه مصنوعی سرباره باطله مسی

مقاله علمی – پژوهشی

علی اکبرزاده*، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق، یزد، ایران
علیرضا یاراحمدی بافقی، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی متالوژی و معدن، دانشگاه یزد، یزد، ایران
حسین علی لازمی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق، یزد، ایران
علی اکبر دهقان‌زاده بافقی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی متالوژی و معدن، دانشگاه یزد، یزد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: akbarzadeh230@gmail.com

دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۱۲– پذیرش: ۱٤۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۵۱۲-۵۰۳

چکیده

سرباره‌ها، محصول جانبی تولید کارخانه‌های آهن و فولاد هستند که اغلب به‌صورت دپوهای بزرگ در اطراف این کارخانه‌ها انباشته می‌شوند. در طول سال‌ها تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان جهت مصرف این ماده انجام و زمینه‌های متعددی برای این منظور پیشنهادشده است. یکی از این زمینه‌ها که می‌تواند در حجم زیادی سرباره‌ها را مورداستفاده قرار دهد، استفاده به‌عنوان مصالح سنگی در تولید آسفالت است. ازاین‌رو این تحقیق به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی انجام‌شده است که تاکنون مطالعه‌ی دقیقی در این خصوص انجام‌نشده است. بدین منظور با ۸ نوع مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی نمونه‌های آسفالتی تهیه شد. سپس بر روی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده، آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی انجام شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS عملکرد روسازی تهیه‌شده با مصالح طبیعی و مصنوعی موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به ترتیب مقاومت مارشال، نسبت مارشال و مقدار BPN نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۲۶، ۳۳ و ۳/۵ درصد از مقدار میانگین نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی کم‌تر است و مقدار روانی آن ۶ درصد بیش‌تر از میانگین روانی نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است. علاوه بر این نتایج آزمون T نشان می‌دهد که بین دو پارامتر مقاومت مارشال و نسبت مارشال آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی و طبیعی اختلاف معناداری وجود دارد؛ اما بین پارامترهای روانی و BPN آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی و طبیعی اختلاف معناداری وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: روسازی راه، سرباره باطله، سرباره مسی، سنگدانه مصنوعی، مصالح سنگی طبیعی

۱-مقدمه

برای بهبود مشخصات و افزایش مقاومت در برابر خرابی‌ها، مواد و مصالح مختلفی در آزمایشگاه ارزیابی می‌شوند و روش‌های گوناگونی پیشنهادشده است. ازجمله این روش‌ها، می‌توان به افزایش کیفیت مصالح روسازی، افزایش ضخامت لایه‌های روسازی، تثبیت و استفاده از مصالح مناسب در لایه‌های مختلف روسازی اشاره کرد (Ahn et al., 2015; Asi, 2007; Xie et al., 2013; Zhou et al., 2019; Y. Gan et al., 2022). سرباره‌ها ازجمله مصالحی هستند که از مقاومت بالایی برخوردارند و می‌توان از آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. از طرفی، کاربرد ضایعات صنعتی ناشی از فرایندهای

گوناگون کارخانه‌ها صنعتی برای به دست آوردن محصولات مختلف از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت است که ازجمله می‌توان به مواردی از قبیل کمک به حفظ و نگهداری منابع طبیعی غیرقابل جایگزین، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بازیابی انرژی‌های صرف شده در طی تولید این ضایعات اشاره کرد (Gong et al., 2021). ازاین‌رو پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام‌شده است. پاندیر و همکارانش، سرباره مس را با مصالح ریزدانه‌ی مخلوط آسفالتی جایگزین کردند که نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از سرباره مس به‌عنوان ریزدانه باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌شود (Pundhir et al., 2005). در پژوهشی دیگر، زیاری و خبیری (۲۰۰۷) به بررسی استفاده از سرباره ذوب‌آهن اصفهان به‌عنوان جایگزین مصالح ریزدانه پرداختند. در این پژوهش چهار نوع مخلوط آسفالتی ساخته شد که شامل ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد (وزنی) سرباره بود و نوع آخر بدون سرباره تهیه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از سرباره می‌تواند عملکرد آسفالت را بهبود بخشد؛ به‌گونه‌ای که این نوع مصالح می‌تواند باعث بهبود مقاومت آسفالت در برابر صدمات رطوبتی شده و سرباره به‌عنوان مصالحی مناسب جهت جایگزینی مصالح سنگی معمول معرفی‌شده است(Ziari & Khabiri, 2007). همچنین در تحقیق انجام‌شده توسط پاتل و همکارانش (۲۰۰۷)، مشخص شد که سرباره مس به میزان ۷۰٪ و خاکستر بادی به میزان ۳۰٪ می‌تواند به‌عنوان جایگزین مصالح طبیعی در خاک‌ریزها و بستر روسازی مورد استفاده قرار گیرد (Patel et al., 2007). همچنین تحقیق انجام‌گرفته توسط کومار و همکارانش (۲۰۱۱) نشان داد که استفاده از سرباره مس در مخلوط ماکادام باعث بهبود خصوصیات آن می‌شود (Hassan & Al-Jabri, 2011). در پژوهشی که توسط لیاپیس و لیکودیس (۲۰۱۲) به‌منظور بررسی تأثیر نوع سنگ‌دانه بر مقاومت لغزشی انجام شد، قسمتی از بزرگراه اگناتیا به طول ۱۵ کیلومتر را موردبررسی قراردادند. ۱۲ کیلومتر از این بزرگراه با استفاده از مصالح حاوی سرباره کوره قوس الکتریکی و ۳ کیلومتر انتهایی آن با مصالح سخت طبیعی ساخته‌شده بود. لازم به ذکر است که هر دو قسمت، شرایط ترافیک و محیطی و آب‌وهوایی یکسانی دارند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین مقاومت لغزندگی در قسمت مصالح حاوی سرباره کوره قوس الکتریکی بیش‌تر از قسمت مصالح طبیعی است؛ بنابراین می‌توان گفت نوع مصالح به‌کاربرده شده در روسازی تأثیر بسزایی در مقاومت لغزشی آن دارد(Liapis & Likoydis, 2012). کاووسی و همکاران در سال ۱۳۹۱ با بیان اینکه خصوصیات مصالح سنگی ازجمله مقاومت فشاری، مقاومت سایشی، زاویه اصطکاک داخلی، شکل مصالح و زبری سطح تأثیر مستقیمی بر عملکرد لغزندگی روسازی‌ها دارد، به بررسی مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره‌ای پرداختند. در این تحقیق از مقاومت لغزندگی آسفالت حاوی دو نوع مصالح سنگ‌دانه آهکی و سرباره فولاد موردبررسی قرار گرفت و نتایج بیانگر آن است که عدد پاندول انگلیسی یا ارزش لغزندگی با جایگزین شدن مصالح درشت‌دانه سرباره فولاد با درشت‌دانه آهکی افزایش‌یافته است که علت این امر را می‌توان بافت متخلخل و زبر سنگ‌دانه‌های سرباره دانست (کاووسی و همکاران، ۱۳۹۱). علاوه‌براین در تحقیق انجام‌گرفته توسط اسکاف و همکارانش، به بررسی و آنالیز سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌شده است که نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین مصالح درشت‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و دوام آن‌ها شود(Skaf et al., 2017). علاوه‌براین‌ها، حسن‌زاده خباز (۱۳۹۹) در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی مصالح سرباره فولاد قوس الکتریک، به بررسی استفاده از درصدهای مختلف سرباره فولاد به‌صورت درصدی از مصالح سنگی درشت پرداخت و دریافت که مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کششی (اشباع نسبت به خشک) مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد قوس الکتریک نسبت به نمونه شاهد بیش‌تر است (حسن‌زاده خباز،۱۳۹۹). عموزاده عمرانی و همکارانش در سال ۱٤۰۱ به بررسی امکان استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح در روسازی‌های بتن غلتکی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش تأثیر جایگزینی مصالح خرده آسفالت بازیافتی به‌عنوان مصالح درشت‌دانه و سرباره فولاد به‌عنوان مصالح ریزدانه با درصدهای متفاوت بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج آزمایش‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش جایگزینی مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد در نمونه‌های بتن غلتکی، مقاومت فشاری کاهش‌یافته است. همچنین نتایج آزمایش چقرمگی نشان داد که با افزایش

مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، مقدار بار حداکثر کاهش یافت؛ ولی با توجه به افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط‌های بتن غلتکی، قابلیت جذب انرژی و به‌تبع آن چقرمگی افزایش یافت(عمرانی و همکاران.، ۱٤۰۱).

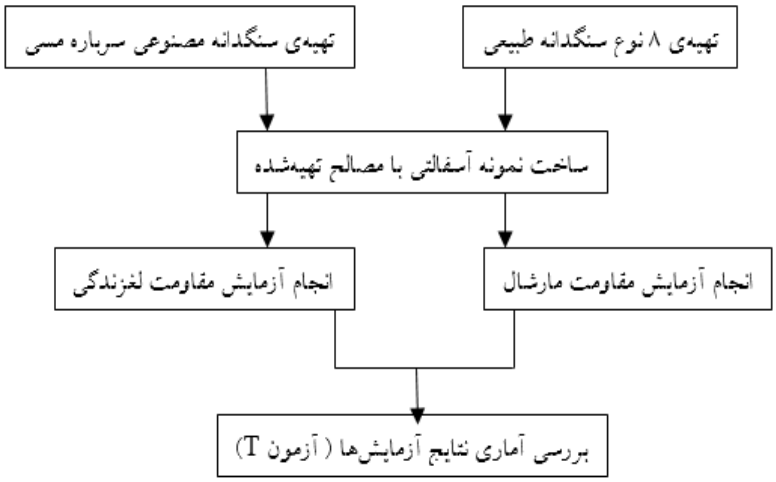
در سال ۲۰۲۲ نیز لوریرو و همکارانش به بررسی جایگزینی سرباره فولاد و سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی برای تأمین مواد پایدار برای صنعت روسازی آسفالت پرداختند و دریافتند که ترکیب سنگ‌دانه‌های سرباره فولادی یا سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی برای روسازی جاده‌ها دارای مزایای عملکردی، مکانیکی و زیست‌محیطی است (Loureiro et al., 2022). ناصر و همکارانش نیز در سال ۲۰۲۳ به بررسی بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالت بازیافتی روسازی با استفاده از سرباره فولاد و دوده سیلیس به‌عنوان پرکننده پرداختند. نتایج آزمایشگاهی، نشان‌دهنده اثربخشی استفاده از چنین افزودنی‌هایی به‌عنوان ماده پرکننده بود(Naser et al., 2023). لو و همکارانش (۲۰۲۳) نیز در پژوهشی به شبیه‌سازی‌های دینامیکی مولکولی، نظریه انرژی آزاد سطح و تحلیل تصاویر اشعه ایکس را برای توصیف مقاومت آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولادی پرداختند و یافتند که قطبیت بالاتر و اجزای قلیایی سرباره فولادی به استحکام بین پیوند آن‌ها کمک می‌کند و درنتیجه تمایل به حساسیت به رطوبت کاهش می‌یابد(Liu et al., 2023). به‌طورکلی نتایج پژوهش‌های پیشین گویای عملکرد مثبت آسفالت تهیه‌شده با سرباره‌های فولادی است(Liu et al., 2022). رن و یان نیز بابیان اینکه سازه سنگ‌دانه نقش مهمی در عملکرد روسازی مصالح راه دارد، به بررسی خصوصیات مکانیکی سازه سنگ‌دانه برای مصالح روسازی پرداختند. در این پژوهش برای درک این ساختار پیچیده، آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش المان گسسته برای بررسی خواص مکانیکی ماکروسکوپی ساختار سنگ‌دانه و نیروهای تماس میکروسکوپی سنگ‌دانه‌ها مورداستفاده قرار گرفت، بنابراین نقش مکانیکی سنگ‌دانه و ویژگی‌های تکاملی ساختار سنگ‌دانه آشکار شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جنس مصالح و دانه‌بندی آن تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد روسازی دارد (Renl & Yin ., 2022). تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بررسی عملکرد روسازی تهیه‌شده با مصالح سنگ‌دانه‌ای مصنوعی انجام‌شده است؛ اما تاکنون پژوهشی به بررسی تأثیر مصالح سنگی طبیعی و مصنوعی بر عملکرد آسفالت نپرداخته است؛ ازاین‌رو این پژوهش باهدف مقایسه‌ی عملکرد آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی طبیعی و سنگدانه مصنوعی حاصل‌شده از سرباره باطله مسی انجام‌شده است.

۲-روش تحقیق

در این پژوهش به‌منظور بررسی مقایسه‌ی عملکرد آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی، با ۸ نوع مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی نمونه‌های آسفالتی تهیه شد. سپس بر روی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی انجام شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS عملکرد روسازی تهیه‌شده با مصالح طبیعی و مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱ فلوچارت روش تحقیق ارائه شده است.

۲-۱-مشخصات مصالح

در این پژوهش ۸ نوع مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله‌ی مسی مطابق جدول ۱ مورداستفاده قرار گرفت که ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی طبیعی در جدول ۲ ارائه‌شده است. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق حد وسط دانه‌بندی پیوسته‌ی شماره‌ی ٤ جدول ۱ نشریه ۲۳٤، مطابق شکل ۲ است. همچنین قیر مورداستفاده در این پژوهش قیر ۷۰-٦۰ است. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی، روش مارشال به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی مختلف با چهار درصد متفاوت قیر شامل ٤/۵، ۵، ۵/۵ و ٦ درصد به تعداد سه عدد، برای افزایش دقت، ساخته شد. بعد از تعیین درصد قیر بهینه با توجه به انواع سنگ‌دانه‌های مختلف، نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه برای انجام آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی آسفالت آماده شد.



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

جدول ۱. معرفی انواع سنگ‌دانه مورداستفاده

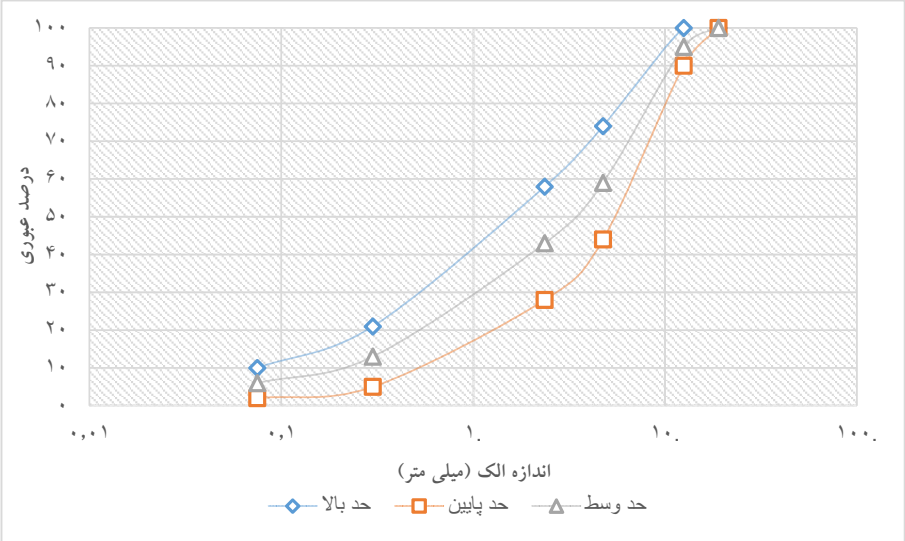
شماره نمونه	نوع سنگ	نوع سنگ
۱	طبیعی	آذرین داسیت
۲		دگرگونی (کانی کلسیت)
۳		آذرین دیوریت
٤		رسوبی (سنگ‌آهک)
٥		رسوبی (ماسه‌سنگ)
٦		رسوبی (ماسه‌سنگ کوارسیتی)
۷		دگرگونی (مرمریت)
۸		دگرگونی (کانی کلسیت)
۹	مصنوعی	باطله‌ی مس

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سنگ‌دانه‌های طبیعی

شماره نمونه / ترکیبات	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
Fe	۱/۰۹	۰/۷۸	۱۲/۸	۱/۸۷	۱/۷	۱/۰۹	۰/۷۸	۱/۰۹
FeO	۰/۰٦	۰/۰۳	٥/٥	۱	۰/۹	۰/۰۷	۰/۰٦	۰/۰۸
MnO	۰/۰٤۲	۰/۰٦	۰/۱۳۱	۰/۰٤	۰/۰٥	۰/۰٥۱	۰/۰٤۱	۰/۱۱٥
SiO_2	٥۸/۳۷	۲/٤۸	٦۲/٦۳	٥/٤۳	٥/٥	۷٥/۲۱	۳/۱۲	۱/۰۲
AL203	۱٥/٥	۰/۹٤	۷/۰۹	۱/۷٦	۱/۸	۲/۲۱	۰/٤٤	۰/۳
MgO	۰/٤٥	۰/٤۲	۱/۲٦	۲/۰۸	۲	۱	۰/٥۹	۱٥/۰۱
CaO	۲/۳۲	٥٤/٤٥	۲/٥۳	٤٦/٤۹	٤٥/٥	۱/۸٤	٥٥/۲۸	۳٤/٥

۳-آزمایش‌های انجام‌شده

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی با انواع مصالح سنگدانه طبیعی و سرباره باطله‌ی مسی، آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی بر روی آن‌ها انجام شد.



شکل ۲. دانه‌بندی مورد استفاده

۲-۲-۱-آزمایش مقاومت مارشال

مقاومت فشاری مارشال عبارت است از حداکثر باری که نمونه تحت آزمایش مارشال بدون شکستگی تحمل می‌نماید. این مقاومت به‌تنهایی معیار پایداری محسوب نمی‌شود و باید جهت تعیین این معیار، پارامتر روانی نیز تعیین گردد. تغییر شکل نسبی آسفالت یا همان روانی به میزان وارفتگی یا تغییر شکل آسفالت تحت بار وارده در آزمایش اطلاق می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر میزان فشردگی نمونه قبل از شکستن را روانی می‌نامند. این دو پارامتر که به‌عنوان پارامترهای پایداری آسفالت شناخته می‌شود از آزمایش مقاومت فشاری مارشال به دست می‌آید (Astm D 6927-15, 2010).

۲-۲-۲-آزمایش پاندول انگلیسی

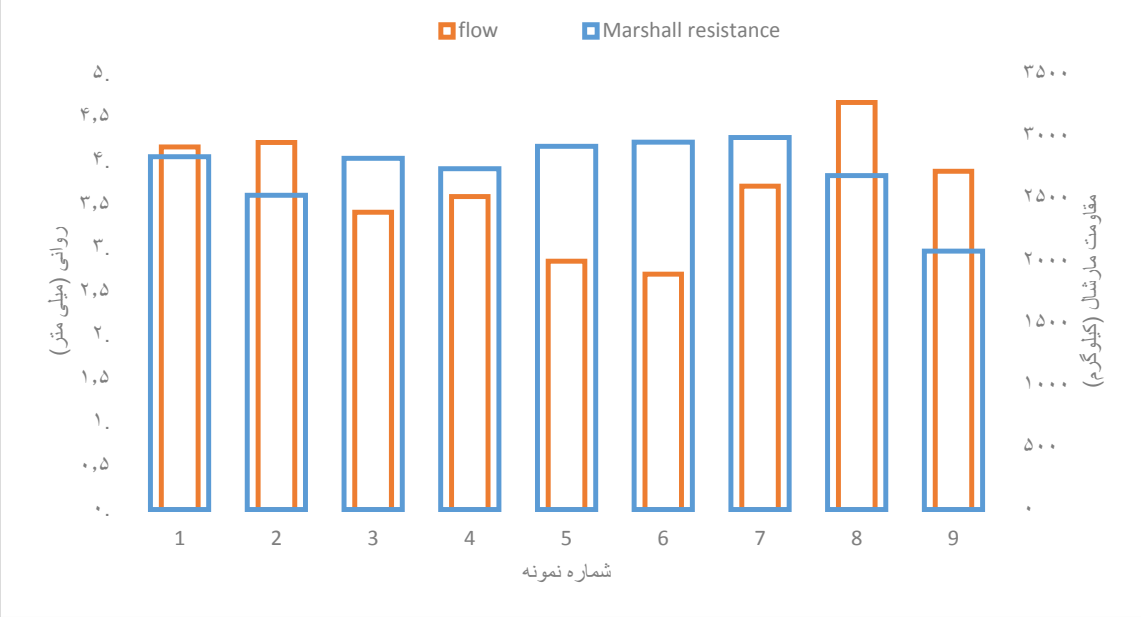
پس ساخت نمونه‌های آسفالتی، به‌منظور ارزیابی لغزندگی نمونه‌ها از دستگاه پاندول انگلیسی استفاده شد. در این پژوهش میانگین ۵ قرائت متوالی مشروط بر این‌که بیش از ۳ واحد باهم اختلاف نداشته باشند، به‌عنوان عدد پاندول در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که روی دستگاه پاندول انگلیسی دو بازه عدد وجود دارد، یکی بین ۰ تا ۱۵۰ و بیانگر مقاومت لغزندگی (BPN) و دیگری و بازه دومی بین ۰ تا ۱۰۰ و بیانگر PSV است(ASTM E303, 2022).

۲-۳-آزمون آماری

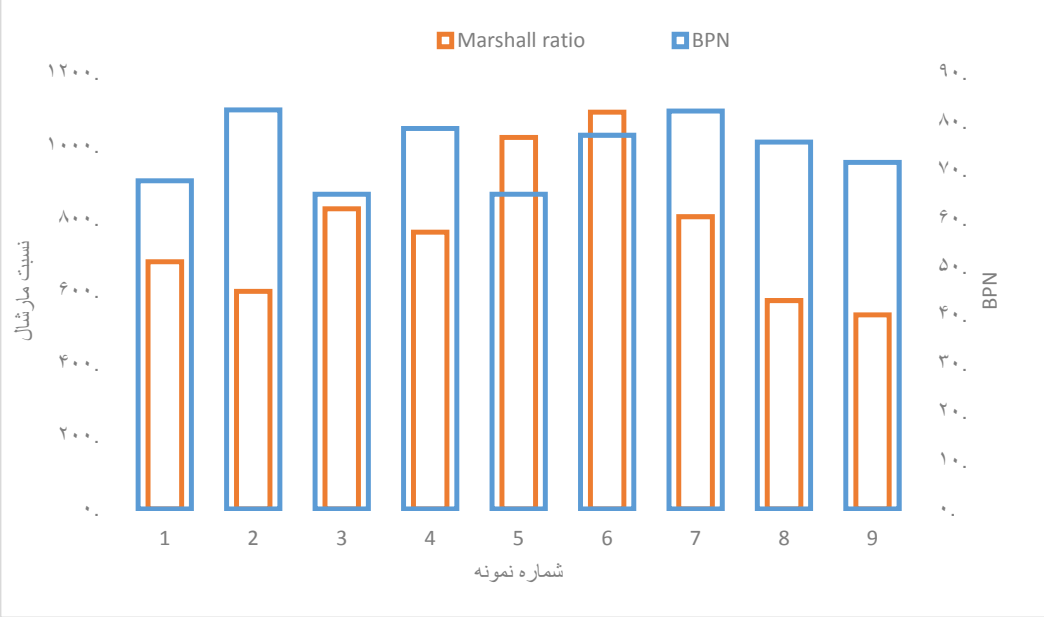
آزمون تی برای تعیین اختلاف معناداری میانگین یک گروه با یک مقدار پیش‌فرض و یا میانگین‌های دو گروه به کار می‌روند. یکی از نرم‌افزارهای مورداستفاده برای انجام آزمون تی، نرم‌افزار SPSS است. SPSS یک نرم‌افزار تحلیلی و آنالیزی است که اطلاعات را در قالب‌های مختلف دریافت می‌کند و مورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار می‌دهد. نرم‌افزار SPSS یا نرم‌افزار بسته آماری برای علوم اجتماعی (Statistical package for social science) در سال ۱۹٦۸ توسط نرمن نی ابداع و منتشر شد و در علم مهندسی بسیار کاربرد دارد (Hinton et al., 2004). در این پژوهش نیز به‌منظور انجام آزمون T و مقایسه‌ی عملکرد آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

٤-نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با انواع سنگدانه طبیعی و سنگدانه باطله‌ی مسی در شکل ۳ ارائه‌شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف-مقاومت مارشال و روانی آسفالت با سنگدانه مصنوعی در مقایسه سنگدانه طبیعی

ب- نسبت مارشال و مقاومت لغزندگی آسفالت با سنگدانه مصنوعی در مقایسه سنگدانه طبیعی

با توجه به شکل ۳ مقدار مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۲٦ درصد از مقدار میانگین مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی کم‌تر است و مقدار روانی آن ٦ درصد بیش‌تر از میانگین روانی نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است. از طرفی نسبت مارشال نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۳۳ درصد کم‌تر از میانگین نسبت مارشال نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است. همچنین مقدار BPN، مربوط به آزمایش مقاومت لغزندگی، برای نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۳/۵ درصد کم‌تر از میانگین روانی BPN نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است. درواقع ازآنجاکه مقاومت و زبری سرباره مسی مورد استفاده نسبت به مصالح سنگی طبیعی مورداستفاده کم‌تر است و از طرفی خصوصیات مصالح تشکیل دهند آسفالت تأثیر مستقیمی بر عملکرد مخلوط آسفالتی دارد(Wu, S et al., 2023)، پارامترهای مقاومتی آسفالت ازجمله مقاومت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت لغزندگی کاهش و میزان روانی آسفالت افزایش‌یافته است؛ اما به‌طورکلی با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سنگدانه مصنوعی باطله مسی، عملکرد مناسبی را دارا هستند که با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز همخوانی دارد (Raposeiras et al., 2016; Ziari et al., 2019). همچنین آزمون T به‌منظور بررسی معنادار بودن اختلاف نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس و نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی با نرم‌افزار SPSS انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه‌شده است. در آزمون T، اگر مقدار Sig. (2-tailed) کم‌تر از ۰/۰۵ باشد، اختلاف معناداری بین آن دو پارامتر وجود دارد. مطابق جدول ۳ دو پارامتر مقاومت مارشال و نسبت مارشال آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی و طبیعی اختلاف معناداری وجود دارد؛ اما بین پارامترهای روانی و BPN آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی و طبیعی اختلاف معناداری وجود ندارد.

جدول ۳. نتایج آزمون T به منظور بررسی معنی‌دار نتایج

نام پارامتر	F	Siq	t	Siq.(2-tailled)
مقاومت مارشال	۱٤/۹۲٦	۰/۰۰۲	۱۳/۳۹۳	۰/۰۰
روانی	۱۵/۲۰۵	۰/۰۰۲	-۰/۹۰۷	۰/۳۸
نسبت مارشال	۱۳/٤۷٦	۰/۰۰۳	۳/۹۵۹	۰/۰۰۱
BPN	۳۵/٦٤۲	۰/۰۰	۱/۰۲۸	۰/۳۲۲

۵-نتیجه‌گیری

سرباره‌ها ازجمله سرباره مسی، مصالح زائدی هستند که از مقاومت بالایی برخوردارند و می‌توان از آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. از طرفی، کاربرد ضایعات صنعتی در پروژه روسازی باعث کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بازیابی انرژی‌های صرف شده در طی تولید این ضایعات می‌شود. اما تاکنون مطالعه‌ای در خصوص عملکرد آسفالت تهیه‌شده با سرباره مسی و مقایسه آن با آسفالت تهیه‌شده با مصالح طبیعی انجام‌نشده است. ازاین‌رو این تحقیق به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی انجام‌شده است. بدین منظور با ۸ نوع مصالح سنگی طبیعی و سرباره باطله مسی نمونه‌های آسفالتی تهیه شد. سپس بر روی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی انجام شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS عملکرد روسازی تهیه‌شده با مصالح طبیعی و مصنوعی موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

-مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۲٦ درصد از مقدار میانگین مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی کم‌تر است و مقدار روانی آن ٦ درصد بیش‌تر از میانگین روانی نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است.

-از طرفی نسبت مارشال نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۳۳ درصد کم‌تر از میانگین نسبت مارشال نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است. همچنین مقدار BPN، مربوط به آزمایش مقاومت لغزندگی، برای نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سرباره مس ۳/۵ درصد کم‌تر از میانگین روانی BPN نمونه‌های آسفالت تهیه‌شده با سنگدانه طبیعی است؛

-همچنین نتایج نشان می‌دهد که آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی (سرباره مس) عملکرد مناسبی را دارا است. علاوه بر این نتایج آزمون T نشان می‌دهد که بین دو پارامتر مقاومت مارشال و نسبت مارشال آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی و طبیعی اختلاف معناداری وجود دارد؛ اما بین پارامترهای روانی و BPN آسفالت تهیه‌شده با مصالح سنگی مصنوعی و طبیعی اختلاف معناداری وجود ندارد.

-به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که جنس مصالح سنگی تأثیر بسزای بر عملکرد آسفالت دارد؛ ازاین‌رو با توجه به هدف پروژه باید مصالح سنگی مناسب را برای ساخت روسازی آسفالتی انتخاب کرد.

۶-سپاسگزاری

لازم به ذکر است که این مقاله برگرفته از رساله دکتری تحت عنوان مقایسه ویژگی‌های ژئومکانیکی انواع سنگ‌دانه‌های طبیعی (آهکی و سیلیسی) نسبت به سنگ‌دانه‌های مصنوعی و تأثیر آن بر رفتار لایه رویه راه است. بدین‌وسیله از آزمایشگاه‌های معدن و عمران دانشگاه یزد و تمامی اساتید بزرگواری که در تکمیل این پژوهش راهنمایی کردند، قدردانی می‌شود.

۷-مراجع

-Astm D 6927-15. (2010). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures. Annual Book of American Society for Testing Materiasl ASTM Standards, *i*, 1–7. **doi.org/10.1520/D6927-15**

-ASTM E303. (2022). Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester.

-Amuzadeh Omrani, M., Hassannejad, A., Shahbazi, V. (1401). Investigating the possibility of using recycled asphalt and steel slag materials as a part of the replacement of materials in roller concrete pavements. *Concrete Materials and Structures*, 7(1), 1-20. (In Persian)

-Gan, Y., Li, C., Chen, A., Li, Y., & Wu, S. (2022). A model of pyrolysis carbon black and waste chicken feather using a response surface method in hot-mix asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(11), 04022278.

-Gong, F., Liu, Y., You, Z., & Zhou, X. (2021). Characterization and evaluation of morphological features for aggregate in asphalt mixture: A review. *Construction and Building Materials*, *273*, 121989.

-Hassan, H. F., & Al-Jabri, K. (2011). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *23*(6), 879–885.

-Hassanzadeh Khabaz, A. (2019). Evaluation of mechanical properties of hot asphalt mixes containing electric arc steel slag materials. *Transportation Research Journal*, 17(3), 19-23. (In Persian)

-Hinton, P. R., Brownlow, C., & McMurray, I. (2004). SPSS explained. *Psychology Press.*

-Kavossi, A., Ahmadi, A., Jalili Ghazizadeh, M., Ali Nesab, R. (1391). Investigating the slip resistance of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag materials and determining its optimal percentage. *The Third International Conference on Traffic and Road Accidents.* (In Persian)

-Liapis, I., & Likoydis, S. (2012). Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *48*, 907–918.

-Liu, J., Wang, W., Wang, Y., Zhou, X., Wang, S., Liu, Q., & Yu, B. (2023). Towards the sustainable utilization of steel slag in asphalt

-Ren, J., & Yin, C. (2022). Investigating mechanical characteristics of aggregate structure for road materials. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(2), 372-386.
-Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-López, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, *120*, 176–185.
-Wu, S., Wu, Q., Shan, J., Cai, X., Su, X., & Sun, X. (2023). Effect of morphological characteristics of aggregate on the performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 367, 130219.
-Zhou, C., Zhang, M., Li, Y., Lu, J., & Chen, J. (2019). Influence of particle shape on aggregate mixture's performance: DEM results. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(2), 399–413.
-Ziari, H., & Khabiri, M. M. (2007). Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, *15*(3), 188–192.
-Ziari, H., Moniri, A., Imaninasab, R., & Nakhaei, M. (2019). Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, *20*(7), 775–781.
pavements: A case study of moisture resistance and life cycle assessment. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, e01722.
-Liu, J., Xu, J., Liu, Q., Wang, S., & Yu, B. (2022). Steel slag for roadway construction: a review of material characteristics and application mechanisms. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *34*(6), 3122001.
-Loureiro, C. D. A., Moura, C. F. N., Rodrigues, M., Martinho, F. C. G., Silva, H. M. R. D., & Oliveira, J. R. M. (2022). Steel slag and recycled concrete aggregates: replacing quarries to supply sustainable materials for the asphalt paving industry. *Sustainability*, *14*(9), 5022.
-Naser, M., Abdel-Jaber, M., Al-Shamayleh, R., Ibrahim, R., Louzi, N., & AlKhrissat, T. (2023). Improving the Mechanical Properties of Recycled Asphalt Pavement Mixtures Using Steel Slag and Silica Fume as a Filler. *Buildings*, *13*(1), 132.
-Patel, S., Vakharia, P. P., & Raval, S. M. (2007). Use of copper slag and fly ash mix as subgrade and embankment fill material. *Indian Highways*, *35*(11), 17.
-Pundhir, N. K. S., Kamaraj, C., & Nanda, P. K. (2005). Use of copper slag as construction material in bituminous pavements.
-Raposeiras, A. C., Vargas-Cerón, A., Movilla-Quesada, D., & Castro-Fresno, D. (2016). Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, *119*, 268–276.

Comparison of Performance of Asphalt Prepared with Natural Stone Materials and Artificial Aggregate of Copper Waste Slag

Ali Akbarzadeh, Ph.D., Student, Faculty of Mining Engineering and Technology, Islamic Azad University, Bafaq Branch (Yazd Province), Yazd, Iran.
Alireza Ahmadi Bafghi, Associate Professor, Faculty of Engineering and Mining Metallurgy, Yazd University, Yazd, Iran.
Hossein Ali Lazemi, Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering and Technology, Islamic Azad University, Bafaq Branch (Yazd Province), Yazd, Iran.
Ali Akbar Dehghanzadeh Bafghi, Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering and Technology, Islamic Azad University, Bafaq Branch, Yazd, Iran.

E-mail:akbarzadeh230@gmail.com

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRCT
Slag is a by-product of iron and steel factories, which are often accumulated in large depots around these factories. Over the years, extensive research has been conducted worldwide for the use of this material and several fields have been proposed for this purpose, one of which is the use of slag as a stone material in the production of asphalt. Therefore, this research was conducted in order to compare the performance of asphalt prepared with natural stone materials and copper tailings slag, which has not been studied so far. For this purpose, asphalt samples were prepared with 8 types of natural stone materials and copper waste slag. Then, Marshall and slip resistance tests were performed on the prepared asphalt samples, and the performance of the pavement prepared with natural and artificial materials was evaluated using SPSS software. The results of this research show that Marshall resistance, Marshall ratio and BPN value of asphalt samples prepared with copper slag are 26, 33 and 3.5% less than the average value of asphalt samples prepared with natural aggregate, respectively, and its flow rate is 6% more than the average. The fluidity of asphalt samples prepared with natural aggregate. In addition, the results of the T test show that there is a significant difference between the two parameters of Marshall resistance and Marshall ratio of asphalt prepared with artificial and natural stone materials; However, there is no significant difference between the psychological parameters and BPN of asphalt prepared with artificial and natural stone materials.

Keywords: Road Paving, Waste Slag, Copper Slag, Synthetic Aggregate, Natural Stone Materials