

تعیین محدوده بهینه قیر در آسفالت سرد سرباره‌ای مبتنی بر تحلیل هم‌ارزی مقاومت-روانی-فضای خالی در مرمت چاله در اقلیم گرم

مقاله علمی - پژوهشی

*محمد مهدی خبیری (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مهدی جوکار، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

فاطمه کریمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

صفحه ۱۶۴-۱۴۵

چکیده

در پژوهش حاضر، امکان‌پذیری فنی کاربرد سنگدانه‌های سرباره‌ای کوره‌ای القایی در آسفالت سرد مرمتی، با تأکید بر تعیین محدوده‌ی بهینه‌ی قیر و تحلیل برهم‌کنش‌های حجمی-مکانیکی، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های مارشال در پنج سطح درصد قیر (۵/۶ تا ۹/۵ درصد) ساخته شده و پس از عمل‌آوری ۱۴ روزه، آزمون‌های مقاومت مارشال، روانی، چگالی حجمی و فضای خالی انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که مقاومت مارشال با افزایش قیر از ۵/۶ به ۹ درصد، از حدود ۱۰۱ به ۲۵۷/۵ کیلوگرم نیرو افزایش یافته، اما افزایش بیشتر به ۹/۵ درصد، علی‌رغم کاهش فضای خالی به ۶/۴۰۱ درصد، منجر به افت مقاومت به ۲۴۱/۷ کیلوگرم نیرو گردید. مدل رگرسیونی با ضریب تعیین ۹۸/۷ درصد برآزش شد که جمله‌ی متقابل آن $\beta_{12} = -۱/۴$ حاکی از برهم‌کنش معکوس معنی‌دار میان قیر و حفرات بود. بر اساس یافته‌ها، محدوده‌ی قیر بهینه در کرانه‌ی ۸/۵ تا ۹ درصد تعیین گردید که ضمن تأمین بیشینه مقاومت و روانی مناسب (۳/۸ تا ۴ میلی‌متر)، فضای خالی را در دامنه‌ی ۷ تا ۸ درصد نگه داشته و شرایط انبساط حرارتی و تراکم ثانویه را در اقلیم هدف فراهم می‌آورد. تحلیل روانی نشان داد که این پارامتر در کل دامنه‌ی قیر، روندی صعودی از ۲/۸۳ تا ۴/۲۸ میلی‌متر دارد و عمدتاً تحت تأثیر ضخامت لایه‌ی قیری است. همچنین، حضور یک کران بیشینه مقاومت در چگالی‌های ۲/۴۶۲ تا ۲/۴۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب تأیید شد که بیانگر عدم تأثیر چشمگیر افزایش چگالی فراتر از محدوده‌ی مذکور بر ارتقای مقاومت است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت سرد، سرباره فولادی، مرمت چاله، مدل‌سازی سطح پاسخ، اقلیم گرم و کم‌بارش

۱-مقدمه

گرمایشی سنگین، محدودیت‌های فصلی و شرایط آب‌وهوایی خاص چالش‌های جدی در سرعت اجرا، دسترسی‌پذیری و هزینه‌های انرژی مواجه می‌باشند. در این میان، آسفالت سرد سرباره‌ای به‌عنوان یک فناوری جایگزین کارآمد، با قابلیت نگهداری و مصرف در دمای محیط، امکان مرمت سریع و مؤثر چاله‌ها را بدون نیاز به عملیات گرمایشی فراهم می‌آورد؛ ویژگی‌هایی نظیر سهولت اجرا، کاهش چشمگیر مصرف انرژی،

در میان انواع خرابی‌های روسازی، پدیده‌ی چاله به‌عنوان یکی از شایع‌ترین و چالش‌برانگیزترین معضلات تعمیر و نگهداری راه‌ها شناخته می‌شود که نه تنها کیفیت خدمت‌دهی و ایمنی تردد را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد، بلکه در صورت عدم مرمت به‌موقع، هزینه‌های تعمیراتی سنگین‌تری را به‌دنبال خواهد داشت. روش‌های متداول مرمت چاله‌ها عمدتاً بر پایه‌ی استفاده از آسفالت گرم استوار هستند که به‌دلیل نیاز به تجهیزات

امکان انبار طولانی مدت و کاربرد در تمام فصول سال، این فناوری را به راهکاری جذاب برای بهره‌برداری و نگهداری روسازی‌ها تبدیل ساخته است. در میان پسماندهای صنعتی قابل بازیافت در صنعت راه‌سازی، سرباره‌ی که بسته به نوع کوره‌ی تولیدکننده (کوره‌ی بلند، کوره‌ی اکسیژن قلیایی، کوره‌ی قوس الکتریکی و کوره‌ی پاتیل) و روش سردسازی (هواخنک، آب‌خنک، پیرسازی طبیعی یا سردسازی تسریع‌شده) دارای تنوع رفتاری زیاد است، با ویژگی‌هایی نظیر چگالی بالا، زاویه‌داری مناسب، بافت سطحی زبر، مقاومت سایشی و چسبندگی مطلوب با قیر، پتانسیل بالایی برای جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی دارد (Becerra-Duitama, & Rojas-Avellaneda, 2022).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که سرباره‌ی فولادی با ایجاد قفل‌وبست داخلی قوی‌تر میان دانه‌ها، می‌تواند به بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش سفتی مخلوط آسفالتی، و مقاومت در برابر خستگی بارگذاری و نیز سایش شود (Dovom, et.al. 2024, Jakati, & Kumar, 2024). با این وجود، کاربرد سرباره‌ی فولادی در مخلوط‌های آسفالتی با چالش‌هایی نیز همراه است که از جمله می‌توان به جذب بالای قیر به دلیل تخلخل درون‌دانه‌ای، احتمال انبساط حجمی ناشی از وجود اکسیدهای آزاد کلسیم و منیزیم CaO و MgO و وابستگی شدید رفتار نهایی به روش سردسازی و فرایند پیرسازی اشاره کرد. این پیچیدگی‌ها به‌ویژه در کاربردهای مرمتی با آسفالت سرد که فرایند تراکم و گیرش در دمای محیط انجام می‌شود و مصالح با چالش‌های بیشتری در دستیابی به چگالی و مقاومت نهایی مواجه هستند، نیازمند بررسی‌های نظام‌مند و دقیق در سطح طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد می‌باشند (Tang, et.al. 2026, Hao, et.al. 2026).

تفاوت نحوه چسبندگی در آسفالت سرد (معمولاً شامل قیرهای محلول یا امولسیون‌های قیری با فرایند گیرش آهسته‌تر) نسبت به آسفالت گرم، ایجاب می‌کند که برهم‌کنش قیر-سنگ‌دانه در حضور سرباره و تأثیر آن بر پارامترهای کلیدی نظیر چگالی، فضای خالی، مقاومت مارشال و روانی به‌طور مستقل مطالعه شود. از سوی دیگر، اقلیم گرم و کم‌بارش با ویژگی‌هایی نظیر دمای بالای عملکردی روسازی، نوسانات شدید حرارتی روزانه و نبود رطوبت کافی برای گیرش برخی از سامانه‌های سرد، شرایط خاصی را بر عملکرد وصله‌های تعمیراتی تحمیل می‌کند که نمی‌توان نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در اقلیم‌های معتدل یا

سرد را به‌طور مستقیم به آن تعمیم داد. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی به بررسی امکان‌پذیری فنی استفاده از سرباره‌ی فولادی در آسفالت سرد برای کاربرد مرمت چاله‌ها در مناطق گرم و کم‌بارش می‌پردازد. شایان ذکر است که بر اساس چارچوب تعریف‌شده برای فاز نخست این مطالعه، تحلیل اقتصادی، برآورد هزینه یا مقایسه‌ی مالی میان استفاده از سرباره‌ی فولادی و مصالح سنگی متداول در این مقاله گنجانده نشده است؛ بلکه تحلیل هزینه-فایده و ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر ترمیم‌ها، در صورت تأیید امکان‌پذیری فنی-اجرایی، به فازهای بعدی پژوهش موکول می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

مرمت چاله‌های روسازی همواره یکی از چالش‌برانگیزترین موضوعات در حوزه نگهداری و بهره‌برداری راه‌ها محسوب می‌شود. روش‌های سنتی ترمیم چاله‌ها غالباً پرهزینه و زمان‌بر بوده و در بسیاری از موارد، به‌ویژه در شرایط آب‌وهوایی نامساعد یا مناطق دورافتاده، با محدودیت‌های جدی مواجه هستند (Wang, et.al., 2023). در این میان، در آسفالت سرد. تجارب اجرایی بین‌المللی نشان می‌دهد که کاربرد سرباره فولادی در مخلوط‌های آسفالتی تعمیرات، بیش از آنکه مبتنی بر رویکردهای صرفاً آزمایشگاهی باشد، متأثر از ملاحظات اجرایی، دسترسی به مصالح و نیاز به بازگشایی سریع مسیرها بوده است. در ایالات متحده و کانادا، استفاده از سرباره فولادی در آسفالت مرمتی بیشتر در قالب پروژه‌های پایلوت و تحت نظارت سازمان‌های حمل‌ونقل ایالتی انجام شده است.

در این کشورها، آسفالت کیسه‌ای نقش مهمی در تعمیرات سریع چاله‌ها و خرابی موضعی و در شرایط آب‌وهوایی سرد یا مناطق دور دارد (Jakati, et.al. 2024, Pasetto, et.al., 2023). بر اساس گزارش‌های منتشرشده، جایگزینی بخشی از سنگ‌دانه طبیعی با سرباره فولادی در این نوع مخلوط‌ها منجر به افزایش مقاومت اولیه در برابر کنده‌شدگی و بهبود عملکرد در برابر بارهای ترافیکی سبک تا متوسط شده است. این ویژگی به‌ویژه در تعمیرات موقت که زمان بهره‌برداری کوتاه اما حساس است، یک مزیت عملکردی محسوب می‌شود. با بررسی سیستم‌های چسبندگی مختلف، از جمله قیرهای پس برگشته اصلاح‌شده با روغن‌ها، نشان دادند که جایگزینی سنگ‌دانه‌های متداول با سرباره کوره قوس الکتریکی می‌تواند به بهبود استحکام و

پژوهشگران رویکردهای مختلفی را برای اصلاح سطح سرباره و کاهش این آسیب‌پذیری‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از این رویکردها، استفاده از اصلاح‌کننده‌های سطحی نظیر کامپوزیت‌های حاوی گروه‌های ایزوسیانات و هیدروکسیل است که با تشکیل یک لایه اصلاحی متراکم بر روی سطح سرباره، ضمن مسدودسازی حفرات درشت و سطوح زیر، از تماس اکسیدهای آزاد با آب جلوگیری می‌نماید. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اصلاح سطح سرباره می‌تواند به طور مؤثری جذب آب، سایش و چگالی ظاهری را کاهش داده و در عین حال، با ایجاد سطوح زیرتر برای درگیری مکانیکی با قیر و همچنین گروه‌های شیمیایی فعال برای پیوند با اجزای قطبی قیر، چسبندگی را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد. مخلوط‌های تهیه‌شده با سرباره اصلاح‌شده در شرایط بهینه، از مقاومت خوبی در برابر آسیب رطوبتی، چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن و پایداری حجمی برخوردار بوده‌اند. همچنین پژوهشگران در مطالعات دیگری به بررسی قابلیت خودترمیمی مخلوط‌های سرد حاوی سرباره فولادی پرداخته‌اند. یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از سرباره درشت‌دانه و پودر سرباره می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی قابلیت ترمیم ترک‌ها را در مخلوط‌های سرد از طریق تابش امواج مایکروویو افزایش دهد؛ به‌گونه‌ای که مدول صلبیت نمونه‌های خشک، مرطوب و مشروط به چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن بهبود یافته است. (Sarkkinen, et.al. 2019)

این دستاوردها می‌تواند بر بسیاری از محدودیت‌های سرباره فولادی در کاربردهای سرد فائق آمد و مسیر را برای کاربرد گسترده‌تر این ماده در مرمت‌های موضعی هموار ساخت. در ایران، کاربرد سرباره فولادی در مخلوط‌های آسفالتی در سطح پروژه‌های ملی هنوز محدود است؛ اما مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد این ماده قابلیت استفاده در روسازی‌های آسفالتی را دارد. مطالعات داخلی معتبر نشان داده‌اند که استفاده از سرباره فولادی به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های مخلوط‌های آسفالتی، می‌تواند بهبود در پایداری، مقاومت مکانیکی و در برابر رطوبت ایجاد کند (Kumar, et.al, 2023).

در این پژوهش‌ها، جایگزینی سنگ‌دانه درشت با سرباره فولادی باعث افزایش قفل‌وبست سنگدانه و بهبود رفتار مقاومتی مخلوط در برابر بارگذاری‌های مکرر شده است. همچنین مطالعات دیگر نشان داده‌اند که سرباره فولادی به دلیل سطح ویژه و زبری بیشتر می‌تواند جذب قیر را افزایش دهد و در صورت کنترل‌نشدن بر کاهش قیر مؤثر تأثیر بگذارد؛ بنابراین درصد قیر و کنترل دانه‌بندی اهمیت زیاد دارد. (Zhang, et.al. 2026)

پژوهشگران داخلی با بررسی سرباره فولادی به‌عنوان سنگ‌دانه درشت در مخلوط‌های سرد، نشان داده‌اند که با انتخاب دانه‌بندی مناسب و کنترل دقیق طرح اختلاط، می‌توان به عملکردی

چسبندگی مخلوط‌های سرد ترمیم‌کننده چاله منجر شود. با این حال، تجارب آمریکای شمالی به طور صریح به چالش‌های اجرایی نیز اشاره می‌کنند. افزایش وزن مخصوص سرباره، تفاوت رفتار تراکم نسبت به سنگ‌دانه طبیعی و نیاز به تنظیم دقیق درصد قیر از جمله مواردی است که در صورت عدم توجه می‌تواند منجر به کاهش کیفیت اجرای وصله‌های تعمیراتی شود. در کشورهای اروپایی به‌ویژه آلمان، فرانسه، هلند و کشورهای اسکانندیناوی، استفاده از مخلوط آسفالت با سرباره فولادی دارای سابقه است؛ با این حال کاربرد آن در آسفالت سرد مرمتی نسبت به آسفالت گرم کارخانه‌ای محدودتر بوده است (Ziari, et.al., 2007).

در اغلب پروژه‌های اروپایی، سناریوی جایگزینی سنگ‌دانه درشت با سرباره فولادی به‌عنوان کم‌ریسک‌ترین گزینه انتخاب شده است؛ چراکه این رویکرد به دلیل کاهش حساسیت مخلوط نسبت به افزایش سطح ویژه و جذب قیر، سازگاری بیشتری با ماهیت آسفالت مرمتی سرد داشته است. نتایج اجرایی این پروژه‌ها نشان می‌دهد که حضور سرباره فولادی درشت‌دانه می‌تواند موجب افزایش پایداری اولیه، بهبود قفل‌وبست سنگ‌دانه‌ای و کاهش تغییر شکل دائمی در دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت شود. در مقابل، کاربرد سرباره ریزدانه یا پودر سرباره در آسفالت سردمرمتی با محدودیت بیشتری مواجه بوده است؛ چراکه افزایش جذب قیر و کاهش قیر مؤثر در این حالت می‌تواند به افت دوام، کاهش کارایی اجرا و افزایش ریسک خرابی زودرس منجر شود. (Yang, et.al. 2025).

این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که انتخاب سناریوی مناسب جایگزینی، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست پروژه‌های کاربرد سرباره در آسفالت سرد ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی کاربرد سرباره فولادی در مخلوط‌های آسفالتی سرد، مسئله پایداری حجمی و مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی است. پژوهشگران به‌صراحت اشاره کرده‌اند که سرباره فولادی با وجود پتانسیل بالای خود، دارای کاستی‌هایی از جمله پایداری حجمی ضعیف و مقاومت نامناسب در برابر آسیب‌های رطوبتی است که کاربرد آن را در مهندسی روسازی، به‌ویژه در مخلوط‌های آسفالتی سرد، محدود می‌سازد (Amouzadeh Omrani, 2023).

این محدودیت‌ها عمدتاً ناشی از وجود اکسیدهای آزاد کلسیم و منیزیم در ساختار سرباره است که در تماس با رطوبت، واکنش‌های انبساطی نامطلوبی ایجاد می‌کنند. در این راستا،

۳-روش تحقیق

۳-۱-مشخصات مصالح مصرفی

پیش‌نیاز هر طراحی مخلوط معتبر، شناخت دقیق ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مصالح تشکیل‌دهنده است. در این پژوهش، کلیه مصالح شامل سنگدانه‌های سرباره‌ی کوره‌ی القایی (تأمین‌شده از شرکت آرش پولاد نگین‌طوس)، قیر امولسیون کاتیونیک CSS-1h (تأمین‌شده از شرکت قیر سامان سازان راه دانش شرق) تحت آزمون‌های استاندارد مطابق جدول قرار گرفتند.

همچنین به‌منظور ارزیابی پایداری حجمی سرباره در برابر واکنش‌های هیدراتاسیون اکسیدهای آزاد کلسیم و منیزیم CaO و MgO که از مهم‌ترین چالش‌های کاربرد سرباره در روسازی محسوب می‌شود، آزمون انبساط بالقوه مطابق با ASTM D4792 بر روی نمونه‌های متراکم‌شده‌ی سرباره انجام پذیرفت. در این آزمون، نمونه‌ها در قالب CBR در محلول آب با pH معادل ۱۲ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت حداقل ۷ روز غوطه‌ور شده و میزان انبساط به‌صورت روزانه با استفاده از دستگاه دیال‌گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. حداکثر انبساط مجاز بر اساس معیارهای بین‌المللی حداکثر ۰/۵ درصد در نظر گرفته شد که نتایج اولیه نشان‌دهنده‌ی قرارگیری سرباره‌ی مورد مطالعه در محدوده‌ی قابل‌قبول بود. برای قیر امولسیون CSS-1h، آزمون‌های ویسکوزیته (ASTM D88)، پایداری انبارداری (ASTM D244)، آزمون بار ذره‌ای (ASTM D224)، آزمون الک (ASTM D244)، آزمون اختلاط با سیمان (ASTM D244) و آزمون تقطیر (ASTM D244) مطابق با الزامات AASHTO M208 انجام شد. نتایج این آزمون‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

قابل‌قبول از نظر مقاومت مارشال، مقاومت در برابر رطوبت و تغییر شکل دائمی دست یافت. در زمینه دوام، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فولادی می‌تواند مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی را بهبود بخشد، به‌شرط آنکه سطح سرباره از نظر آلودگی و گردوغبار کنترل شود و فراوری مناسب انجام شود. باوجود محدودیت داده‌های رسمی، چند تجربه داخلی در سطح پابلوت یا پروژه‌های تحقیق‌محور گزارش شده است که می‌تواند به‌عنوان نمونه‌های اولیه برای کاربرد در آسفالت سرد مورد استفاده قرار گیرد. این تجربیات عمدتاً شامل استفاده از سرباره فراوری‌شده در مخلوط‌های آسفالتی گرم برای مسیرهای کم‌ترافیک یا تعمیرات موضعی بوده است. در این پروژه‌ها، سناریوی جایگزینی سنگ‌دانه درشت با سرباره فولادی به‌عنوان گزینه اول انتخاب شده و نتایج اولیه نشان‌دهنده بهبود پایداری و مقاومت اولیه مخلوط بوده است؛ بااین‌حال چالش‌هایی مانند افزایش وزن مخصوص مخلوط، تغییر در کارایی و حساسیت به درصد قیر، به‌عنوان مشکلات اجرایی گزارش شده‌اند و نیاز به تنظیم دطرخ اختلاط دارد. (Manjushree, & Lokeshwari, 2026)

جمع‌بندی تجارب اجرایی بین‌المللی و پژوهش‌های آزمایشگاهی داخلی نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فولادی در آسفالت سرد مرمتی به‌صورت بالقوه امکان‌پذیر است، اما موفقیت آن وابستگی بالایی به سناریوی جایگزینی، سطح فراوری سرباره و کنترل طرح قیر دارد (Kumar, et.al, 2025). برای دستیابی به عملکرد قابل‌قبول، تعیین دقیق طرح اختلاط و درصد قیر بهینه با توجه به افزایش جذب قیر توسط سرباره و اثرات آن بر قیر مؤثر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چراکه عدم کنترل این پارامتر می‌تواند منجر به کاهش دوام و افزایش حساسیت مخلوط نسبت به تغییرات شرایط محیطی شود. پژوهشگران در مطالعات اخیر به‌صراحت اشاره کرده‌اند که با وجود چالش‌های موجود، سرباره فولادی به دلیل سختی بالا، مقاومت سایشی عالی و پتانسیل خودترمیمی، گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای عملکردمحور در لایه‌های رویه و مرمت‌های موضعی محسوب می‌شود این رویکرد گام به‌گام، ضمن تأمین الزامات فنی، امکان تصمیم‌سازی مبتنی بر شواهد را در هر مرحله فراهم آورده و از صرف هزینه و زمان برای سناریوهای غیرقابل‌قبول جلوگیری می‌نماید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های سرباره‌ای مصرفی (کوره القایی)

حدود مجاز (مرجع)	واحد	مقدار	روش استاندارد	ویژگی / آزمون
-	gr/cm ³	۲/۷۷۱	ASTM C127	وزن مخصوص ظاهری
-	gr/cm ³	۲/۶۵۴	ASTM C127	وزن مخصوص در حالت
-	gr/cm ³	۲/۵۸۷	ASTM C127	وزن مخصوص حقیقی
-	%	۲/۶	ASTM C127	درصد جذب آب
حداکثر ۳۰٪ (برای روسازی)	%	۲۷	ASTM C131	مقاومت در برابر سایش
حداکثر ۱۵٪	%	۹	ASTM D4791	درصد ذرات تطویل
حداکثر ۱۵٪	%	۵	ASTM D4791	درصد ذرات تورق

چگالی بالای سرباره (نزدیک به ۲/۷۷) نسبت به سنگدانه‌های طبیعی مرسوم (حدود ۲/۶)، نشان‌دهنده‌ی جرم مخصوص بیشتر و در نتیجه افزایش وزن مخصوص مخلوط نهایی است که می‌تواند به بهبود پایداری در برابر تغییر شکل دائمی کمک کند. درصد جذب آب ۲/۶ درصد برای سنگدانه‌های سرباره‌ای در محدوده‌ی معمول (۲ تا ۴ درصد) قرار دارد و بیانگر تخلخل درون‌دانه‌ای قابل توجهی است که در طراحی قیر امولسیون‌ی باید لحاظ گردد. مقاومت سایشی ۲۷ درصد، نشان‌دهنده‌ی دوام

مناسب این سرباره برای کاربرد در لایه‌های روسازی (مطابق با ضابطه‌ی حداکثر ۳۰ درصد نشریه ۲۳۴) می‌باشد. همچنین درصد پایین ذرات پولکی و سوزنی (مجموعاً ۱۴ درصد) حاکی از شکل دانه‌های مناسب برای ایجاد قفل و بست مکانیکی مطلوب در مخلوط آسفالتی است، شکل (۱) نمونه‌ای از سنگدانه‌های سرباره‌ای را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات قیر امولسیون‌ی کاتیونیک CSS-1h مصرفی

محدوده مجاز (ASTM D2397 / AASHTO M208)	مقدار / نتیجه	روش استاندارد	ویژگی / آزمون
مشخصات پایه امولسیون			
۱۰۰-۲۰	۲۰-۱۰۰ (SFS)	ASTM D88	ویسکوزیته Saybolt Furol در ۲۵°C
حداکثر ۱ درصد	حداکثر ۱ درصد	ASTM D244	پایداری انبارداری (۲۴ ساعت)
مثبت	مثبت (کاتیونیک)	ASTM D224	آزمون بار ذره‌ای
حداکثر ۱۰/۰ درصد	حداکثر ۱۰/۰ درصد	ASTM D244	آزمون الک
حداکثر ۲ درصد	حداکثر ۲ درصد	ASTM D244	آزمون اختلاط با سیمان
تقطیر و باقیمانده قیر			
حداقل ۵۷٪	حداقل ۵۷٪	ASTM D244	باقیمانده حاصل از تقطیر
مشخصات قیر باقیمانده پس از تقطیر			
حداقل ۴۰	حداقل ۴۰ (سانتی‌گراد)	ASTM D113	کشسانی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۹۰-۴۰	۹۰-۴۰ (۰/۱ میلی‌متر)	ASTM D5	نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد گرم ۱۰۰-۵ ثانیه-
حداقل ۹۷/۵ درصد	حداقل ۹۷/۵٪ وزنی	ASTM D2042	حلالیت در تری‌کلرواتیلن

است که برای انبارش طولانی مدت آسفالت سرد حیاتی می‌باشد. همچنین نفوذ قیر باقیمانده در محدوده ۴۰-۹۰ نشان‌دهنده قیر با درجه‌ی نفوذپذیری متوسط است که تعادل مناسبی بین مقاومت و انعطاف‌پذیری در دمای محیط فراهم می‌آورد و برای شرایط اقلیمی گرم و کم‌بارش که سفتی قیر در دمای بالا اهمیت دارد، کاملاً مناسب ارزیابی می‌شود.

انتخاب قیر امولسیون CSS-1h با خاصیت کندگیر برای آسفالت سرد مرمتی، به دلیل فرصت کافی برای اختلاط، حمل و پخش در کارگاه می‌باشد. بار ذره‌ای مثبت این امولسیون، چسبندگی عالی با سنگدانه‌های سیلیسی و سرباره‌ای (که معمولاً بار سطحی منفی دارند) ایجاد می‌کند. ویسکوزیته در محدوده ۲۰-۱۰۰ SFS، کارایی مناسب برای پوشش‌دهی یکنواخت سنگدانه‌ها را تضمین می‌نماید. پایداری انبارداری پایین (کمتر از ۱٪) به معنای عدم جدایش سریع قیر و آب در مدت نگهداری



شکل ۱. نمایی از سنگدانه‌های سرباره‌ی کوره‌ی القایی پس از فرآوری، نمونه‌های آماده‌شده برای آزمون لوس آنجلس و دانه‌بندی تفکیک‌شده در آزمایشگاه

۳-۲- انتخاب دانه‌بندی و مبانی طراحی مخلوط

حفرات توسط مصالح ریزدانه را نیز فراهم می‌آورد. انتخاب این دانه‌بندی با توجه به مطالعات پیشین بر روی مخلوط‌های سرد حاوی سرباره و نیز محدودیت‌های اجرایی مرتبط با تراکم در شرایط کارگاهی صورت پذیرفته است. در مخلوط‌های سرد، فرایند شکستن امولسیون و تشکیل پیوند قیر-سنگدانه به شدت به سطح تماس مؤثر وابسته است؛ از این رو وجود درصد مناسبی از ریزدانه‌ها و فیلر برای جذب قیر امولسیون و تشکیل فیلم قیری یکنواخت ضروری می‌باشد.

با این حال، افزایش بیش از حد ریزدانه‌ها می‌تواند به افزایش سطح ویژه و در نتیجه افزایش مصرف قیر مؤثر و نیز کاهش نفوذپذیری و افزایش حساسیت به رطوبت منجر شود. دانه‌بندی انتخابی، با رعایت محدوده‌های میانی در هر الک، از بروز این پدیده‌های نامطلوب جلوگیری نموده و ضمن تأمین کارایی اختلاط، بستر مناسبی برای ارزیابی تأثیر جایگزینی سنگدانه طبیعی با سرباره بر پارامترهای حجمی-مکانیکی فراهم می‌آورد.

انتخاب دانه‌بندی مناسب در مخلوط‌های آسفالت سرد، نقشی تعیین‌کننده در دستیابی به عملکرد مطلوب ایفا می‌کند. در آسفالت سرد، به دلیل عدم استفاده از دماهای بالا، انرژی تراکم در کارگاه به مراتب کمتر از مخلوط گرم است؛ بنابراین ساختار دانه‌بندی باید به گونه‌ای طراحی شود که با حداقل انرژی تراکم، بیشینه‌ی قفل‌وبست مکانیکی و پایداری ساختاری حاصل گردد. این امر مستلزم ایجاد تعادل میان ذرات درشت (تأمین‌کننده‌ی اسکلت سنجی و مقاومت اصطکاکی) و ذرات ریز و فیلر (تأمین‌کننده‌ی سطح تماس برای چسبندگی قیر و پرکننده‌ی حفرات) است.

بر این اساس، دانه‌بندی پیشنهادی در این پژوهش مطابق با دانه‌بندی شماره‌ی ۳ از جدول ۲-۱۲ نشریه‌ی ۳۶۲ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور انتخاب گردید. این دانه‌بندی که در جدول ۳ ارائه شده است، با دارا بودن حدود ۴۵ تا ۷۰ درصد عبوری از الک شماره‌ی ۴ و ۲ تا ۹ درصد عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰، ضمن تأمین ساختار نسبتاً درشت‌دانه، امکان پرشدن مناسب

جدول ۳. دانه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده در طرح اختلاط (بر اساس نشریه ۳۶۲)

درصد عبوری (%)	اندازه الک (میلی متر)
۱۰۰	۱۹
۹۰-۱۰۰	۱۲/۵
۴۵-۷۰	۴/۷۵
۲۵-۵۵	۲/۳۶
۵-۲۰	۰/۳
۲-۹	۰/۰۷۵

۳-۳- ساخت نمونه‌های مارشال و فرایند عمل‌آوری

برای هر یک از سه دسته مخلوط مورد مطالعه، نمونه‌های استوانه‌ای مارشال با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع اسمی ۶۳/۵ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM D6927 تهیه گردیدند. برای مخلوط‌های سرد (شامل مخلوط حاوی سرباره با قیر امولسیون، دامنه‌ی درصد قیر به‌ترتیب ۵/۶ تا ۹/۵ درصد با گام‌های ۰/۵ درصدی و با سه تکرار برای هر سطح در نظر گرفته شد.

در فرایند ساخت مخلوط‌های سرد، قیر امولسیون CSS-1h در دمای محیط (۱ ± ۲۵ درجه سلسیوس) به سنگدانه‌ها افزوده شده و اختلاط تا حصول یکنواختی کامل (حدود ۲ تا ۳ دقیقه)

ادامه یافت. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تراکم خودکار و با اعمال ۵۰ ضربه در هر طرف (مطابق با رویه‌ی متداول برای مخلوط‌های سرد) تراکم شدند. پس از تراکم، نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت درون قالب باقی ماندند تا از تغییر شکل جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و به‌مدت ۱۴ روز در دمای ۲۵ ± ۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ ± ۵ درصد عمل‌آوری شدند. این دوره‌ی عمل‌آوری طولانی‌تر نسبت به مخلوط گرم، برای تکمیل فرایند شکستن امولسیون، تبخیر آب و ایجاد پیوندهای چسبندگی ضروری است. شکل (۲) نمونه‌های ساخته‌شده را در مراحل مختلف از جمله بلافاصله پس از تراکم، در حین آزمون مارشال نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمونه‌های استوانه‌ای مارشال ساخته‌شده از مخلوط سرد سرباره‌ای در مراحل: الف) بلافاصله پس از تراکم، ب) در حین آزمون مارشال

۳-۴- آزمون‌های عملکردی مکانیکی و حجمی

پس از اتمام دوره‌ی عمل‌آوری، کلیه‌ی نمونه‌ها تحت آزمون‌های استاندارد تعیین مقاومت مارشال، روانی، چگالی حجمی و درصد فضای خالی قرار گرفتند. آزمون مقاومت مارشال و روانی مطابق با ASTM D6927 انجام شد. نمونه‌های سرد به‌مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۱ ± ۲۵ درجه سلسیوس (دمای

محیط) و نمونه‌های گرم به‌مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۶۰ ± ۱ درجه سلسیوس غوطه‌ور گردیدند. سپس نمونه‌ها در دستگاه مارشال با نرخ بارگذاری ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه تحت بار فشاری قرار گرفته و حداکثر بار تحمل‌شده (مقاومت مارشال بر حسب کیلوگرم‌نیرو) و مقدار تغییر شکل در لحظه‌ی شکست

به صورت میانگین سه نمونه محاسبه و انحراف معیار مربوطه ثبت گردید. درصد قیر بهینه برای هر سری با استفاده از معیارهای مرسوم روش مارشال شامل بیشینه مقاومت، بیشینه چگالی حجمی، محدوده فضای خالی مجاز ۵ تا ۱۲ درصد برای مخلوط سرد و محدوده روانی مجاز حداکثر ۸ میلی متر برای مخلوط سرد تعیین گردید.

۳-۵- نسبت فضای خالی مؤثر به وزن قیر

معادله نسبت فضای خالی مؤثر به وزن قیر بر پایه اصل بقای حجم و تئوری لایه نازک قیر استوار است؛ نسبت $\frac{\gamma_{mb}}{\gamma_{se}}$ درجه ی نزدیکی چگالی مخلوط متراکم به چگالی بالقوه ی سنگدانه ها (یعنی میزان پر شدن حفرات بین دانه های) را در رابطه (۱) نشان می دهد، و عبارت $\frac{100-V_b}{100 \times p_b}$ به ازای هر واحد وزن قیر، حجم فضای جامد ایجاد شده را محاسبه می کند، که بیانگر بازده وزنی قیر در فرآیند تراکم است.

$$CEI = \frac{\gamma_{mb}}{\gamma_{se}} \times \frac{100-V_a}{100 \times VP_b}$$

استانداردهای موجود همچون ASTM D4215 صرفاً به ویژگی های عمومی مخلوط های آسفالت سرد می پردازند و ASTM D5106 نیز صرفاً ویژگی های فیزیکی سنگدانه سرباره را پوشش می دهد. راهنمای FHWA نیز استفاده از سرباره در آسفالت سرد را صرفاً به صورت کلی مطرح کرده است. لذا کنترل معیارهای این پژوهش با ضوابط موجود میسر نبوده و نتایج صرفاً مبتنی بر معیارهای عملکردی تعیین شده در این تحقیق قابل قضاوت است.

(روانی بر حسب میلی متر) ثبت گردید. چگالی حجمی نمونه ها مطابق با ASTM D2726 با استفاده از ترازوی هیدرواستاتیک اندازه گیری شد. چگالی بیشینه نظری مخلوط ها مطابق با ASTM D2041 با استفاده از روش پیکنومتر تعیین گردید. درصد فضای خالی با استفاده از نسبت چگالی حجمی به چگالی بیشینه نظری محاسبه شد. برای ارزیابی حساسیت مخلوط های سرد به رطوبت، آزمون نسبت مقاومت باقیمانده مطابق با روش غوطه وری مارشال بر روی نمونه های منتخب انجام پذیرفت. در این آزمون، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس غوطه ور شده و سپس مقاومت مارشال آن ها با نمونه های شاهد (غوطه ور نشده) مقایسه گردید. همچنین برای ارزیابی دقیق تر رفتار حجمی مخلوط های حاوی سرباره و تأیید پایداری ابعادی آن ها، آزمون انبساط حجمی بر روی نمونه های متراکم شده مطابق با ASTM D4792 با شرایط مشابه آزمون انبساط سنگدانه انجام شد. کلیه ی نتایج آزمون ها برای هر سری و هر سطح درصد قیر

(۱)

تعریف متغیرها

γ_{mb} = چگالی انبوهی نمونه (gr/cm^3)

γ_{se} = چگالی مؤثر سنگدانه ها (gr/cm^3)

V_a = درصد فضای خالی

P_b = درصد قیر بر حسب وزن کل مخلوط.

این شاخص، نسبت حجم مؤثر پر شده به ازای هر واحد وزن قیر را نشان می دهد. در واقع، میزان موفقیت قیر در پر کردن حفرات و افزایش چگالی، نسبت به چگالی بالقوه ی سنگدانه ها سنجیده می شود. با عنایت به بررسی استانداردهای موجود، باید اذعان داشت که در حال حاضر هیچ آیین نامه یا دستورالعمل مدونی که مشخصاً به طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد آسفالت سرد مرمتی حاوی سرباره فولادی پرداخته باشد، وجود ندارد.

۳-۶- مدل سازی سطح پاسخ و تحلیل آماری داده ها

به منظور بررسی عمیق تر روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته و شناسایی برهم کنش های غیرخطی، از رویکرد مدل سازی سطح پاسخ استفاده شد. متغیرهای مستقل شامل درصد قیر، درصد فضای خالی و چگالی واقعی و متغیرهای وابسته شامل مقاومت

(۲)

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_{11} X^2 + \beta_{22} Y^2 + \beta_{12} XY$$

غیرخطی و یافتن ناحیه ی بهینه ی تعاملی را فراهم می کند که در تحلیل دوبعدی به دلیل پنهان ماندن اندرکنش ها، میسر نیست.

۴-۱- اثر متقابل قیر و حفرات بر مقاومت مارشال

در آسفالت سرد سرباره ای

هدف از ترسیم نمودار سه بعدی شکل (۳)، بررسی هم زمان برهم کنش دو پارامتر فیزیکی-مکانیکی حیاتی، یعنی «درصد قیر مصرفی» و «درصد فضای خالی باقیمانده»، بر «مقاومت مارشال» به عنوان شاخص باربری مخلوط آسفالت سرد حاوی مصالح سرباره ای است. این رویکرد چندمتغیره، نسبت به نمودارهای دوبعدی سنتی، درک جامع تری از ناحیه بهینه طرح اختلاط ارائه می دهد؛ چراکه در مخلوط های سرد با سنگدانه های متخلخل سرباره ای، رابطه قیر و حفرات کاملاً غیرخطی بوده و وابستگی متقابلی بر مقاومت نهایی دارند. همان طور که از سطح پاسخ استخراجی مشهود است، با افزایش درصد قیر از ۵/۶ به ۹ درصد، روند کاهشی مستمری در فضای خالی (از ۱۲/۱۵ به ۷/۰۳ درصد) و به تبع آن، روند صعودی قابل توجهی در مقاومت مارشال (از حدود ۱۰۱ به ۲۵۷/۵ کیلوگرم نیرو) حاصل می شود. این پدیده را می توان به افزایش ضخامت لایه قیری و پر شدن تدریجی حفرات مویرگی و درشت دانه های سرباره نسبت داد که منجر به بهبود چسبندگی بین سطحی و یکپارچگی سازه ای مخلوط می گردد. نکته شاخص، جهش ناگهانی مقاومت در محدوده ۸ تا ۸/۵ درصد قیر است (افزایش حدود ۷۰ کیلوگرم نیرو) که علیرغم نوسان جزئی در فضای خالی (۹/۷۲ به ۹/۸۶ درصد) رخ می دهد؛ این امر نشان دهنده وقوع «حجم بحرانی قیر مؤثر» است که در آن، قیر نه تنها منافذ را پر می کند، بلکه با ایجاد پیوندهای دوقطبی قوی تر بر روی سطوح زاویه دار و زبر سرباره، شبکه ی استخوان بندی سنگدانه ای را به بیشینه ظرفیت باربری خود می رساند. بر اساس یافته های نمودار، مهم ترین رخداد قابل تأمل، افت محسوس مقاومت

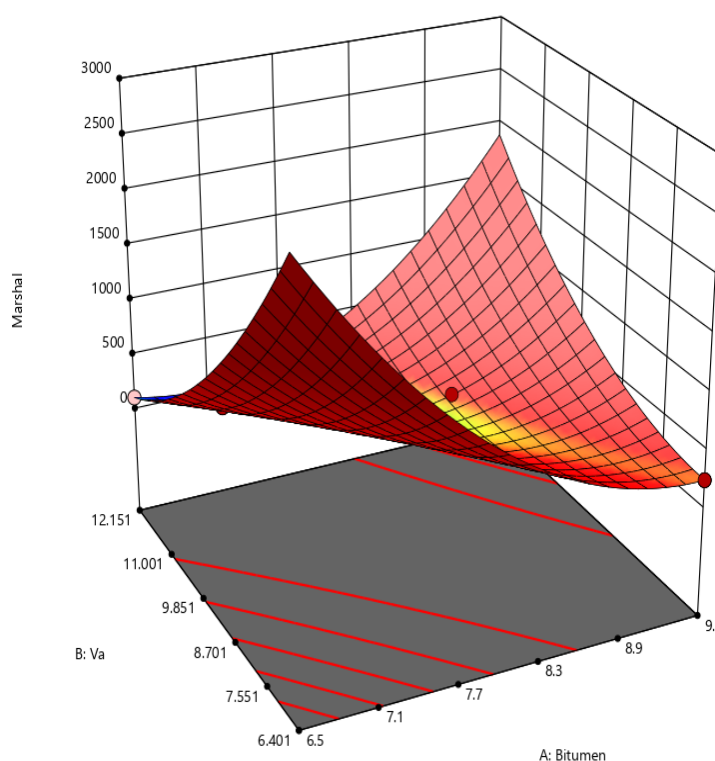
که در آن Z متغیر وابسته (مقاومت مارشال یا روانی)، X و Y متغیرهای مستقل (درصد قیر، درصد فضای خالی یا چگالی واقعی)، β_0 ضریب ثابت، β_1 و β_2 ضرایب خطی، β_{11} و β_{22} ضرایب درجه ی دو، و β_{12} ضریب جمله ی متقابل (برهم کنش) هستند. ضرایب مدل با استفاده از روش حداقل مربعات و با به کارگیری نرم افزار آماری تعیین گردیدند. نیکویی برازش مدل ها با استفاده از ضریب تعیین R^2 و ضریب تعیین تعدیل یافته $Radj^2$ ارزیابی شد. همچنین به منظور بررسی معناداری آماری تفاوت های میان مخلوط های مختلف و نیز تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته، از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵٪ ($\alpha = 0.05$) استفاده گردید. نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ برای هر جفت متغیر مستقل ترسیم شده و محدوده های بهینه با استفاده از روش بهینه سازی هم زمان تعیین گردید. این رویکرد تحلیلی، امکان شناسایی دقیق نقاط بهینه ی عملکردی و نیز تشخیص ناهنجاری های رفتاری نظیر کران بیشینه مقاومت و سقوط ناگهانی مقاومت در درصدهای بالای قیر را فراهم می سازد.

۴- بحث

در آسفالت معمول با سنگدانه های متراکم، روابط حجمی عمدتاً تک بعدی و خطی بوده و نمودار دوبعدی مقاومت بر حسب درصد قیر پاسخ گو است. ولی در آسفالت سرباره ای، تخلخل درون دانه ای و جذب متغیر قیر باعث وابستگی چندوجهی مقاومت به هم زمان فضای خالی، چگالی و قیر مؤثر می شود. از این رو، نمودار سه بعدی با نمایش مقاومت مارشال به عنوان تابعی از دو پارامتر حجمی، امکان تجسم برهم کنش های

مارشال در درصد قیر ۹/۵ (کاهش به ۲۴۱/۷ کیلوگرم نیرو) علی‌رغم دستیابی به کمترین میزان فضای خالی (۶/۴۰۱ درصد) است. این رفتار هشداردهنده که در ادبیات فنی به پدیده «روانی و زهکشی قیر و» لغزش دانه‌ها شهرت دارد، بیانگر آن است که افزایش بیش از حد قیر، تماس مستقیم سنگدانه‌ها را با یکدیگر کاهش داده و لایه‌های ضخیم قیری به‌عنوان روان‌کننده عمل می‌کنند. در کاربرد مرمت چاله‌ها در مناطق گرمسیر با بارندگی اندک، این افت مقاومت بسیار حیاتی‌تر از افت ناشی از رطوبت ارزیابی می‌شود؛ چراکه دمای بالای محیط باعث کاهش گرانیوی قیر و تشدید این پدیده در زیر بارهای ترافیکی سنگین می‌شود و به‌سرعت به تغییرشکل دائم (شیارشستگی موضعی) وصله تعمیری منجر می‌شود. از سوی دیگر، بررسی فضای خالی در نقطه بهینه (حدود ۹ درصد قیر با ۷/۰۳ درصد فضای خالی) نشان می‌دهد که مخلوط در محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای برای روسازی‌های سرد (۳ تا ۸ درصد) قرار دارد که ضمن تأمین مقاومت بیشینه، فضای کافی برای انبساط حرارتی جزئی قیر در

روزهای گرم فراهم می‌آورد و از بروز ترک‌های ناشی از فشار داخلی جلوگیری می‌کند. همچنین، مقاومت بالای ثبت‌شده در ۸/۵ تا ۹ درصد قیر، نشان‌دهنده شکل‌گیری ضخامت بهینه لایه قیری بر روی ذرات متخلخل سرباره است که اصطکاک دانه‌ای را بیشینه کرده و در عین حال از خروج قیر از منافذ باز در حین عملیات تراکم سرد جلوگیری می‌نماید. بنابراین، با عنایت به ملاحظات اقلیمی و کاربرد مرمتی، محدوده قیر بهینه برای این طرح اختلاط در کرانه ۸/۵ تا ۹ درصد تعیین می‌شود؛ زیرا این محدوده نه تنها بیشینه مقاومت و سفتی (نسبت مقاومت به روانی) را تأمین می‌کند، بلکه با کنترل دقیق فضای خالی، خطر روان‌شدگی و افت پایداری در فصل تابستان را به حداقل رسانده و دوام وصله را در مواجهه با ترافیک شهری و تنش‌های حرارتی تضمین می‌نماید.



شکل ۳. اثر متقابل قیر و حفرات بر مقاومت مارشال در آسفالت سرد سرباره‌ای

۴-۲- بحث و تفسیر نتایج مدل سازی

با استفاده از داده های آزمایشگاهی (۷ نقطه در دامنه درصد قیر ۵/۶ تا ۹/۵ و درصد فضای خالی ۶/۴ تا ۱۲/۱۵)، مدل های رگرسیونی چندجمله ای درجه دو با جملات متقابل برازش داده شدند. متغیرهای مستقل شامل درصد قیر (X) و درصد فضای خالی (Y) و متغیر وابسته مقاومت مارشال (Z) بر حسب کیلوگرم نیرو در نظر گرفته شدند. با استفاده از روش حداقل مربعات (OLS) و نرم افزار آماری، ضرایب مدل ها استخراج گردید. نتایج تحلیل های آماری در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس معیارهای ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین

تعدیل یافته (R^2_{adj}) و سطح معنی داری (P-value)، مدل کامل (درجه دو با جمله متقابل) به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

این مدل با ضریب تعیین ۹۸/۷٪ و خطای استاندارد پایین، قادر به تبیین بیش از ۹۸ درصد از تغییرات مقاومت مارشال بر اساس تغییرات قیر و حفرات است. جملات درجه دو و جمله متقابل همگی در سطح ۹۵٪ ($P\text{-value} < 0.05$) معنی دار هستند که نشان دهنده وجود برهم کنش قوی بین دو متغیر مستقل و نیز رفتار غیرخطی آشکار مخلوط سرد سرباره ای می باشد.

جدول ۳. ضرایب مدل های رگرسیونی سطح پاسخ برای مقاومت مارشال

متغیر	مدل خطی	مدل درجه دو (بدون متقابل)	مدل کامل (با متقابل)	خطای استاندارد	t-Statistic	P-value
ثابت β_0	۱۱۴۵۰٫۲	-۴۲۸۰٫۵	-۵۸۶۰٫۳	۲۴۵٫۱	-۲۳٫۹۱	۰٫۰۰۲
درصد قیر (X) β_1	-۸۰٫۴	۱۱۱۰٫۸	۱۵۲۰٫۶	۶۲٫۴	۲۴٫۳۷	۰٫۰۰۲
فضای خالی (Y) β_2	۱۵٫۶-	۶۲٫۳	۹۸٫۵	۱۲٫۱	۸٫۱۴	۰٫۰۱۵
$\beta_{11} (X^2)$	-	۶۳٫۵-	-۸۷٫۲	۴٫۳	-۲۰٫۲۸	۰٫۰۰۳
$\beta_{22} (Y^2)$	-	۳٫۸-	۶٫۵-	۱٫۲	-۵٫۴۲	۰٫۰۳۲
$\beta_{12} (XY)$	-	-	۸٫۴-	۲٫۵	-۳٫۳۶	۰٫۰۴۱
آماره های مدل		خطی	درجه دو (بدون متقابل)	کامل (با متقابل)		
R^2		۰/۸۵۱	۰/۹۶۲	۰/۹۸۷		
R^2_{adj}		۰/۷۷۷	۰/۸۸۶	۰/۹۵۸		
مدل P-value		۰/۰۲۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱		
خطای استاندارد برازش		۲۳/۴	۱۲/۷	۶/۳		

بهترین مدل شناسایی شده، معادله ی کامل درجه دو با جمله ی متقابل به صورت رابطه (۳) است.

(۳)

$$Z = -5860.3 + 1520.6X + 98.5Y - 87.2X^2 - 6.5Y^2 - 8.4XY$$

(که ناشی از پر شدن منافذ توسط قیر است) تا نقطه ای مشخص به افزایش مقاومت کمک می کند، اما از آستانه ای به بعد (حدود ۹ درصد قیر)، این برهم کنش به دلیل ضخیم شدن بیش از حد لایه ی قیری و کاهش اصطکاک دانه ای، اثر کاهنده بر مقاومت دارد. ضریب β_2 مثبت ۹۸/۵ نشان دهنده آن است که در

که در آن Z مقاومت مارشال، X درصد قیر و Y درصد فضای خالی است.

جمله ی متقابل ($\beta_{12} = -8.4$) با P-value برابر ۰/۰۴۱، نشان دهنده ی برهم کنش معکوس و معنی دار میان قیر و حفرات است؛ بدین معنا که افزایش هم زمان قیر و کاهش حفرات

می‌دهند، همخوانی کامل دارد. ضریب تعیین بالای مدل کامل ($R^2 = 0.987$) و کاهش چشمگیر خطای استاندارد از ۲۳/۴ در مدل خطی به ۶/۳ در مدل کامل، مؤید برتری مدل غیرخطی با جمله‌ی متقابل در پیش‌بینی رفتار مخلوط سرباره‌ای است. این معادله می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تحلیلی قدرتمند برای تعیین درصد قیر بهینه با در نظر گرفتن هم‌زمان فضای خالی هدف (مثلاً ۷-۸٪) و بیشینه‌سازی مقاومت در کاربردهای مرمی اقلیم گرم و کم‌بارش مورد استفاده قرار گیرد؛ به‌ویژه که جمله‌ی متقابل، هشدار جدی در مورد افزایش هم‌زمان قیر و کاهش حفرات فراتر از محدوده‌ی بحرانی ارائه می‌دهد.

۳-۴- ارزیابی اثر هم‌زمان چگالی واقعی و درصد قیر بر مقاومت مارشال در مخلوط سرد

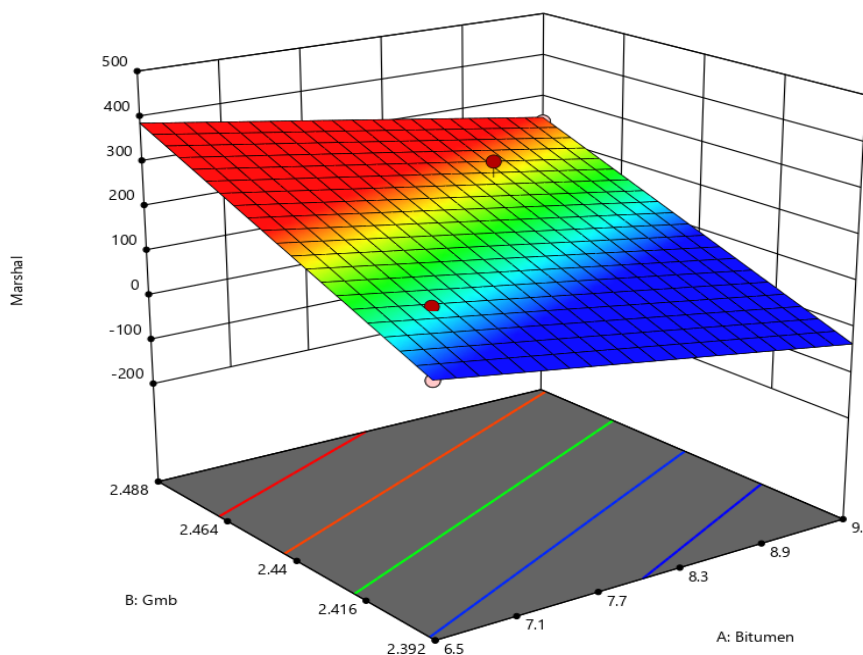
در مناطق گرم و کم‌بارش ارائه می‌دهد. با وجود آنکه در ۹/۵ درصد، فضای خالی به کمترین مقدار خود (۶/۴۰۱ درصد) می‌رسد، مقاومت مارشال به ۲۴۱/۷ سقوط می‌کند. در روسازی مناطق گرمسیر که دمای سطحی وصله‌ها به مراتب بالاتر از دمای محیط می‌رسد، ضریب انبساط حجمی قیر به شدت افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، فضای خالی کمتر از ۷ درصد، ظرفیت جذب انبساط حرارتی قیر را نداشته و منجر به ایجاد تنش‌های فشاری اضافی در محیط بسته حفرات می‌شود. این تنش‌های داخلی، در سیکل‌های روزانه گرم‌شدن و خنک‌شدن، به‌صورت تنش‌های پوسته‌ای کششی در مرز دانه‌ها عمل کرده و زمینه‌ساز گسیختگی چسبنده در فصل مشترک قیر-سنگدانه می‌گردند که نتیجه‌ی نهایی آن، کاهش محسوس مقاومت فشاری محدودشده در آزمون مارشال است. لذا افت مقاومت در ۹/۵ درصد، نشانه مستقیم تغییر مکانیسم گسیختگی از حالت اصطکاکی-چسبنده به گسیختگی ناشی از ضعف در برابر تنش‌های حرارتی-مکانیکی توأمان است. برای کاربرد مرمت چاله‌ها، انتخاب محدوده ۹-۵ درصد قیر نه از نوع صرفاً عددی اوج مقاومت، بلکه به دلیل ایجاد محدوده قابل پذیرش با فضای خالی حدود ۷ تا ۸ درصد توجیه می‌شود. این محدوده ضمن تأمین باربری کافی، حداکثر انعطاف‌پذیری را برای جذب تغییرشکل‌های حرارتی و بارهای ضربه‌ای ناشی از ترافیک شهری فراهم می‌آورد و از وقوع پدیده تمرکز تنش حرارتی که در اثر تمرکز تنش در حفرات فوق‌مترکم رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کند؛ امری که در اقلیم کم‌بارش با اختلاف دمای شبانه‌روزی قابل‌توجه، نقشی تعیین‌کننده در افزایش عمر خدمت‌رسانی وصله‌های تعمیری ایفا می‌نماید.

درصد‌های پایین قیر، افزایش فضای خالی (به‌معنای ساختار بازتر) ممکن است به‌طور موقت مقاومت را افزایش دهد؛ چراکه در سرباره با دانه‌های زبر، فضای خالی بیشتر به معنی تماس‌های اصطکاکی مؤثرتر است.

با این حال، ضرایب منفی جملات درجه دو ($\beta_{11} = -87.2$) و ($\beta_{22} = -6.5$) نشان‌دهنده وجود نقاط بهینه برای هر دو متغیر است؛ به‌گونه‌ای که مقاومت با افزایش قیر تا حدود ۸/۷٪ و با کاهش فضای خالی تا حدود ۹/۵ درصد روند صعودی داشته و سپس افت می‌کند. این یافته با داده‌های خام که در ۹٪ قیر بیشینه مقاومت (۲۵۷/۵) و در ۹/۵٪ سقوط به ۲۴۱/۷ را نشان

و اکاوی سطح پاسخ ترسیم‌شده در شکل ۴، نشان می‌دهد که ارتباط میان کاهش درصد فضای خالی و افزایش مقاومت مارشال در این مخلوط سرباره‌ای، از یک روند خطی ساده تبعیت نمی‌کند و حاوی یک ناهنجاری رفتاری شاخص در محدوده ۸ تا ۸/۵ درصد قیر است. در این بازه، با وجود افزایش ۰/۵ درصدی قیر مصرفی، درصد فضای خالی نه تنها کاهش نمی‌یابد که با جهشی جزئی از ۹/۷۲۲ به ۹/۸۶۳ درصد همراه می‌شود. این پدیده که در ادبیات مهندسی روسازی با عنوان «جذب سطحی حفرات درون‌دانه‌ای از آن یاد می‌شود، ریشه در تخلخل بالای داخلی و بافت اسفنجی سنگدانه‌های سرباره‌ای دارد. بدین معنا که قیر اضافه‌شده در گام نخست، صرفاً صرف پر کردن منافذ موئین و حفرات بسته درون خود سنگدانه‌ها می‌گردد و تأثیری بر کاهش فضای خالی بین‌دانه‌ای (حفرات خارجی مؤثر در باربری) نمی‌گذارد.

با این حال، همین فرایند سبب افزایش چشمگیر مقاومت مارشال از ۱۸۳/۶ به ۲۵۶/۴ کیلوگرم‌نیرو می‌شود. این افزایش متناقض‌نما، بیانگر آن است که سهم اصلی در ارتقای ظرفیت باربری، ناشی از اصلاح سطح ویژه و زبری سنگدانه‌ها از طریق تشکیل لایه‌های نازک قیری جذب‌شده در دیواره‌ی حفرات داخلی است که استحکام پیوندهای شیمیایی-فیزیکی بین قیر و اکسیدهای فعال موجود در ماتریس سرباره (مانند سیلیس و آهن آزاد) را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مقاومت، فارغ از چگالی ظاهری توده، با افزایش مساحت مؤثر چسبندگی رشد می‌کند. گذر از نقطه اوج نمودار در ۹ درصد قیر (با مقاومت ۲۵۷/۵ و فضای خالی ۷/۰۳۲ درصد) به سمت ۹/۵ درصد، یک هشدار بنیادین در خصوص طراحی مخلوط برای کاربرد مرمتی



شکل ۴. ارزیابی اثر هم‌زمان چگالی واقعی و درصد قیر بر مقاومت مارشال در مخلوط سرد

۴-۴- تغییرات روانی مارشال بر اساس قیر و فضای خالی در آسفالت سرد سرباره‌ای

تأثیر ثانویه و ناچیزی بر تغییر شکل‌پذیری کلی توده دارد. به عبارت دقیق‌تر، هرچند افزایش قیر حفرات بین‌دانه‌ای را پر می‌کند، اما در عین حال با ضخیم‌تر کردن لایه‌ی چسبنده، امکان لغزش و چرخش دانه‌های زاویه‌دار سرباره را نسبت به یکدیگر فراهم می‌آورد و این سازوکار اصطکاکی-لایه‌ای است که به‌طور مستقیم روی شاخص روانی فارغ از میزان فضای خالی باقیمانده اثر می‌گذارد.

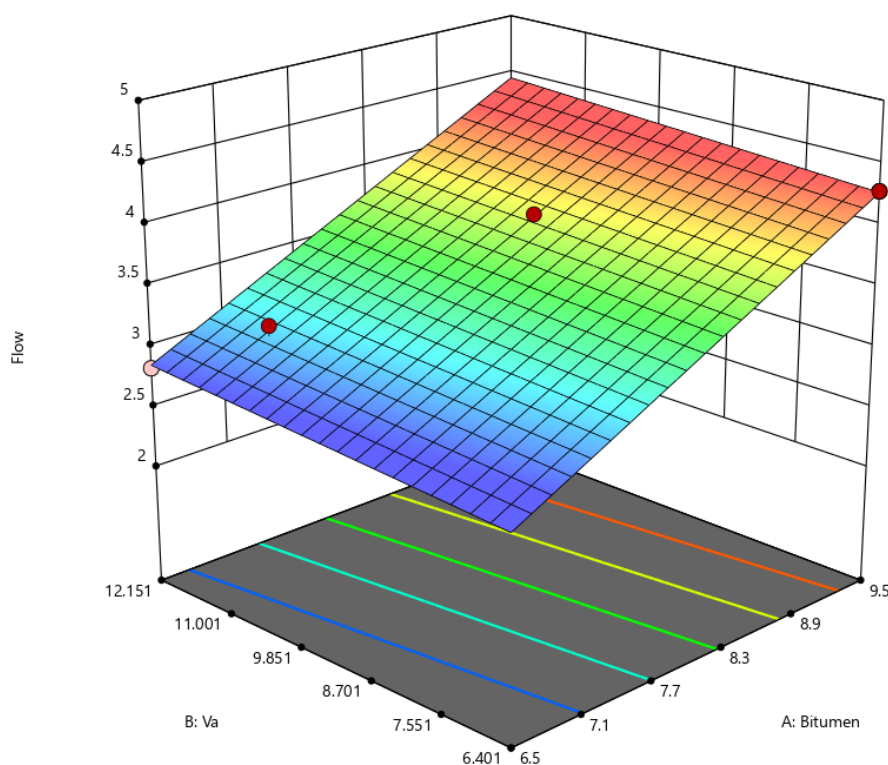
در کاربرد مرمت چاله‌ها در مناطق گرمسیر با بارندگی ناچیز، تفسیر داده‌های روانی می‌بایست در چارچوب «پنجره‌ی تغییر شکل‌پذیری ایمن» صورت گیرد. از یک سو، روانی‌های بسیار پایین (کمتر از ۳ میلی‌متر) که در قیرهای ۵/۶ تا ۷ درصد مشاهده می‌شود، هرچند از دیدگاه پایداری شکل ظاهراً مطلوب به‌نظر می‌رسند، اما در عمل برای وصله‌های تعمیراتی واقع بر روی بسترهای روسازی فرسوده که دارای ترک‌های موضعی و نشست‌های میکرونی هستند، بسیار خطرناک محسوب می‌شوند؛ زیرا مخلوط فاقد انعطاف‌پذیری کافی برای جذب تنش‌های ناشی از عبور چرخ‌های سنگین بوده و بافت سفت و شکننده‌ی

ترسیم نمودار (شکل ۵) سه‌بعدی هم‌ارزی درصد قیر، فضای خالی و روانی مارشال، با هدف واکاوی «واکنش ویسکوپلاستیک مخلوط» در برابر بارهای وارده صورت گرفته است؛ چراکه در آسفالت‌های سرد مخصوص مرمت چاله‌ها، روانی (نشست مخلوط) نه به‌عنوان یک پارامتر منفی، بلکه به‌عنوان شاخص «قابلیت تطابق‌پذیری وصله با بستر نامنظم و نشست‌های موضعی» تلقی می‌شود. سطح پاسخ استخراجی نشان می‌دهد که برخلاف رابطه‌ی مقاومت که دارای نقطه اوج و سقوط بود، پارامتر روانی در کل محدوده قیر مصرفی (از ۵/۶ تا ۹/۵ درصد) روندی یکنواخت صعودی و کاملاً خطی از ۲/۸۳ تا ۴/۲۸ میلی‌متر را دنبال می‌کند و این افزایش، حتی در نقاطی که فضای خالی دچار نوسان ناهنجار می‌شود (مانند جهش فضای خالی از ۹/۷۲۲ به ۹/۸۶۳ درصد در محدوده ۸ تا ۸/۵ درصد قیر)، همچنان پایدار و بدون افت باقی می‌ماند. این پدیده‌ی کلیدی، حکایت از آن دارد که در مخلوط‌های سرد سرباره‌ای، روانی عمدتاً تحت تأثیر ضخامت و روان‌کنندگی لایه‌های قیر قرار دارد و تغییرات فضای خالی (ناشی از تراکم یا تخلخل بین‌دانه‌ای)

آن، به سرعت در لبه‌های وصله دچار ترک‌های انقباضی-برشی شده و سبب شکست زود هنگام از کناره‌ها می‌گردد.

از سوی دیگر، روانی‌های بالاتر از ۴ میلی‌متر (نظیر داده‌های ۹ و ۹/۵ درصد) در اقلیم گرم که دمای عملکردی روسازی به بالای ۵۰ درجه می‌رسد، با کاهش محسوس گرانروی قیر همراه شده و وصله را در معرض خطر جدی‌جریان یافتگی شدن و تغییر ماندگار زیر بارهای تکراری سنگین (به‌ویژه در توقف‌گاه‌ها و تقاطع‌ها) قرار می‌دهد. بنابراین، نمودار مذکور به‌وضوح نشان می‌دهد که محدوده‌ی روانی بین ۳/۵ تا ۳/۹ میلی‌متر (متناظر با قیرهای ۸ تا ۸/۵ درصد) به‌عنوان منطقه‌ی انعطاف‌پذیری بهینه محسوب می‌شود؛ چراکه در این بازه، ضمن تأمین تغییرشکل لازم برای انطباق وصله با بستر ناهموار و تراکم ثانویه تحت ترافیک (که به افزایش چگالی درجا کمک می‌کند)،

از شدت روانی بیش از حد که در دمای بالای محیط به ناپایداری حجمی منجر می‌شود، جلوگیری به عمل می‌آید. این تحلیل، برای اولین بار اولویت را از «حداکثر مقاومت» به «حداقل تغییرشکل مخرب» منتقل می‌کند و نشان می‌دهد که در چنین اقلیمی، کنترل کران بالای روانی الزامی‌تر از دستیابی به اوج مقاومت فشاری است؛ زیرا شکست وصله‌های آسفالت سرد در مناطق گرم و خشک، اغلب نه از گسیختگی داخلی، که از خروج تدریجی مصالح از حاشیه‌ی وصله در اثر تغییرشکل‌های حرارتی-باربری نشئت می‌گیرد و تنظیم دقیق روانی بر اساس این سطح پاسخ، راهکاری بنیادین برای افزایش دوام واقعی مرمت ارائه می‌دهد.



شکل ۵. مدل‌سازی تغییرات روانی مارشال بر اساس قیر و فضای خالی در آسفالت سرد سرباره‌ای

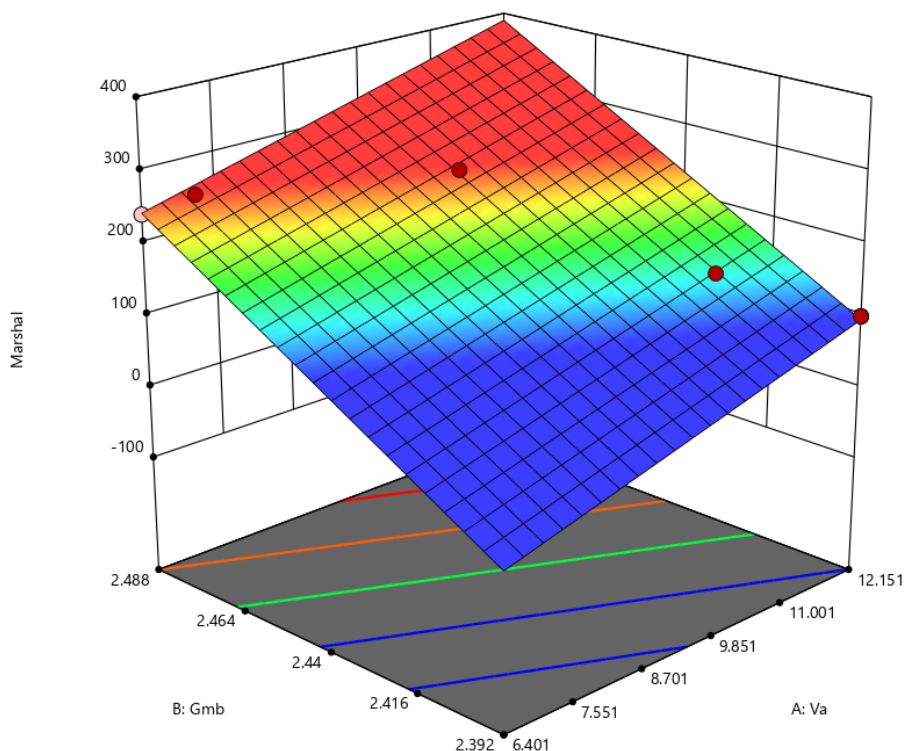
۴-۵- ارزیابی برهم کنش چگالی واقعی و فضای خالی بر مقاومت نهایی مارشال در آسفالت سرد

هدف از ترسیم این نمودار سه بعدی در شکل ۶، زدودن نقش واسطه‌ای درصد قیر و بررسی مستقیم «برهم کنش دو شاخص تراکم پذیری» یعنی چگالی واقعی و درصد فضای خالی، بر مقاومت مارشال است تا مشخص شود که آیا افزایش صرف چگالی می‌تواند به تنهایی تضمین کننده‌ی ارتقای باربری در مخلوط‌های سرد سرباره‌ای باشد یا خیر. شگفت‌انگیزترین یافته‌ی این سطح پاسخ، ظهور یک ناحیهٔ کران بیشینه مقاومت در دو نقطه با چگالی و فضای خالی کاملاً متفاوت است. به گونه‌ای که در نقطهٔ پنجم (فضای خالی ۹/۸۶۳ درصد با چگالی ۲/۴۶۲ گرم بر سانتی متر مکعب)، مقاومت به مقدار ۲۵۶/۴ کیلوگرم نیرو می‌رسد؛ در حالی که در نقطهٔ ششم (فضای خالی ۷/۰۳۲ درصد با چگالی ۲/۴۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب)، مقاومت تنها به ۲۵۷/۵ می‌رسد. این افزایش ناچیز مقاومت (حدود ۱ کیلوگرم نیرو) در ازای کاهش ۲/۳۶ درصدی فضای خالی و افزایش ۰/۹۲ درصدی چگالی، بیانگر وجود یک سامانه‌ی اشباع شده‌ی تماس دانه‌ای است.

به عبارت دقیق‌تر، در مخلوط سرباره‌ای با دانه‌های زاویه دار و سطوح ناصاف، استخوان بندی سنگی در چگالی ۲/۴۶۲ به حداکثر درگیری مکانیکی خود دست یافته است و افزایش بیش‌تر چگالی از این نقطه، صرفاً به پر شدن حفرات ریز و فشردگی بیش از حد لایه‌های قیری منجر می‌شود که سهم افزاینده‌ی آن در مقاومت اصطکاکی، بسیار ناچیز و حاشیه‌ای است. این پدیده به وضوح نشان می‌دهد که در سرباره، برخلاف سنگدانه‌های آهکی یا سیلیسی، مقاومت، تابعی غیرخطی از چگالی بوده و یک کران بالایی برای تأثیرپذیری از تراکم وجود دارد که فراتر از آن، صرفاً هزینه‌ی قیر و انرژی تراکم افزایش می‌یابد بدون دستاورد مکانیکی متناسب.

در کاربرد مرمت چاله‌ها در مناطق گرمسیر با بارندگی اندک، حضور این فلات مقاومتی، یک چارچوب طراحی فراتر از بیشینه سازی چگالی ارائه می‌دهد. در نقطه‌ی پنجم با چگالی کمتر (۲/۴۶۲) و فضای خالی بالاتر (۹/۸۶۳ درصد)، اگرچه توده ظاهراً متراکم‌تر نیست، اما ساختار داخلی از «اتصالات نقطه‌ای

مؤثر» بیشتری برخوردار است؛ زیرا لایه‌ی قیری با ضخامت بهینه، ضمن چسبندگی، از تماس مستقیم و سایشی فلز-به-فلز میان سطوح سخت سرباره جلوگیری می‌کند و اجازه می‌دهد تا دانه‌ها در زیر بار، تغییر مکان جزئی داده و بدون شکستن لبه‌های تیز، مجدداً قفل شوند. در مقابل، نقطه ششم با چگالی بالاتر (۲/۴۸۵)، هرچند حفرات را به شدت کاهش داده، اما عملاً لایه‌ی قیر میان دانه‌ای به حداقل ضخامت بحرانی رسیده و در اقلیم گرم که گرانروی قیر کاهش می‌یابد، این تماس نزدیک دانه‌ها سبب افزایش اصطکاک داخلی خشک و در نتیجه، تمرکز تنش‌های برشی موضعی روی لبه‌های تیز سرباره می‌شود که در درازمدت به خردشدگی تدریجی ریزدانه‌ها و افت دوام وصله می‌انجامد. بنابراین، برای وصله‌های سرد در این اقلیم، انتخاب محدوده چگالی ۲/۴۶۲-۲/۴۴۴ (متناظر با فضای خالی ۸ تا ۱۰ درصد) به مراتب عاقلانه‌تر از دستیابی به چگالی ۲/۴۸۵ است؛ زیرا این محدوده ضمن ارائه‌ی مقاومتی تقریباً برابر با نقطه اوج، حفره‌های کافی برای جذب انبساط حرارتی قیر در اوج گرمای تابستان و نیز فضای لازم برای تراکم ثانویه پیش‌رونده تحت بارهای ترافیکی اولیه را فراهم می‌کند. این تراکم ثانویه، وصله را در روزهای نخست به تدریج به چگالی بالاتر می‌رساند و در عین حال از بروز پدیده‌ی مضر جریان معکوس، ناشی از فشردن شدن بیش از حد حفرات بسته، جلوگیری می‌نماید و نهایتاً با ایجاد یک ساختار خودتراکم شونده و مقاوم در برابر تغییر شکل‌های حرارتی-باربری، عمر مفید مرمت را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد؛ رهیافتی که در آیین‌نامه‌های معمول بر پایه بیشینه چگالی، غالباً نادیده گرفته می‌شود.



شکل ۶. ارزیابی برهم‌کنش چگالی واقعی و فضای خالی بر مقاومت نهایی مارشال در آسفالت سرد

۴-۶- شاخص کارایی تراکم

با اعمال معادله‌ی شاخص کارایی تراکم بر روی سری داده‌ها، روندی کاملاً فیزیکی و غیرخطی مشاهده می‌شود.

در محدوده‌ی $P_b = 6.5\%$ تا 8% ، مقدار CEI به دلیل افزایش چشمگیر γ_{mb} از 2.392 به 2.444 و کاهش شدید V_a از 12.151 به 9.851 ، علی‌رغم افزایش منجر P_b ، رشد صعودی داشته و از حدود 0.47 به 0.68 می‌رسد. اما در گذر از 8% به 5% ، اگرچه V_a به 8.863 کاهش یافته و γ_{mb}

به 2.462 می‌رسد، افزایش هم‌زمان P_b باعث می‌شود CEI تقریباً در همان سطح 0.68 تثبیت شود و سپس در 0.59 با افزایش P_b به 9 و تنها افزایش ناچیز γ_{mb} (تا 2.488)، این شاخص به 0.67 تنزل پیدا می‌کند؛ این پدیده نشان می‌دهد که پس از 8 درصد، بازده هر واحد قیر در پر کردن حفرات مؤثر به حداکثر رسیده و قیر اضافی صرفاً ضخامت فیلم روان‌کننده را، بدون کمک قابل توجهی به تراکم، افزایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، امکان‌پذیری فنی کاربرد سنگدانه‌های سرباره‌ی کوره‌ی القایی در آسفالت سرد جهت مرمت چاله‌های روسازی در اقلیم گرم و کم‌بارش، با اتکا بر طراحی سیستماتیک مخلوط، ساخت نمونه‌های مارشال در پنج سطح درصد قیر ($5/6$ تا $9/5$ درصد) و تحلیل پیشرفته‌ی سطح پاسخ، مورد ارزیابی جامع قرار گرفت. یافته‌های آزمایشگاهی به‌وضوح نشان داد که رفتار حجمی-مکانیکی مخلوط سرد سرباره‌ای از یک روند غیرخطی و متأثر از برهم‌کنش‌های پیچیده‌ی قیر و

حفرات پیروی می‌کند. بر اساس نمودارهای سه‌بعدی و مدل‌سازی رگرسیونی چندجمله‌ای درجه‌ی دو با جمله‌ی متقابل معادله‌ی $R^2 = 0.987$ ، مشخص گردید که مقاومت مارشال با افزایش درصد قیر از $5/6$ به 9 درصد، به‌طور مستمر از حدود 101 به بیشینه‌ی $257/5$ کیلوگرم‌نیرو افزایش می‌یابد که ناشی از پر شدن تدریجی حفرات درون‌دانه‌ای سرباره و بهبود چسبندگی بین‌سطحی است. با این حال، افزایش قیر به $9/5$ درصد، علی‌رغم کاهش فضای خالی به کمترین مقدار

(۶/۴۰۱ درصد)، منجر به افت محسوس مقاومت به ۲۴۱/۷ کیلوگرم نیرو گردید که بیانگر وقوع پدیده‌ی روان‌کنندگی و لغزش دانه‌ها در اثر ضخیم‌شدن بیش از حد لایه‌ی قیری است. همچنین، تحلیل روانی مارشال نشان داد که این پارامتر در کل دامنه‌ی قیر مصرفی، روندی یکنواخت صعودی از ۲/۸۳ تا ۴/۲۸ میلی‌متر دارد که عمدتاً تحت سلطه‌ی ضخامت لایه‌ی قیری بوده و تغییرات فضای خالی تأثیر ثانویه‌ای بر آن دارد. مدل‌سازی سطح پاسخ، برهم‌کنش معکوس و معنی‌دار میان قیر و حفرات را با ضریب $\beta_{12} = -8.4$ در سطح اطمینان ۹۵٪ ($P\text{-value} = 0.041$) تأیید نمود و نشان داد که افزایش هم‌زمان قیر و کاهش حفرات تا آستانه‌ی حدود ۹ درصد قیر، به بیشینه‌سازی مقاومت کمک می‌کند، اما عبور از این آستانه، به دلیل کاهش اصطکاک دانه‌ای و تمرکز تنش‌های حرارتی-مکانیکی، اثر کاهنده بر جای می‌گذارد.

بر اساس یافته‌های فوق و با در نظر گرفتن الزامات اقلیمی گرم و کم‌بارش (دمای عملکردی بالای روسازی، نوسانات شدید حرارتی روزانه و کمبود رطوبت برای گیرش آسفالت سرد)، محدوده‌ی قیر بهینه برای کاربرد مرمتی وصله‌های سرد سرباره‌ای، در کرانه‌ی ۸/۵ تا ۹ درصد تعیین می‌گردد. این محدوده ضمن تأمین بیشینه مقاومت (۲۵۶ تا ۲۵۷ کیلوگرم نیرو) و روانی مناسب (۳/۸ تا ۴ میلی‌متر)، فضای خالی نهایی را در دامنه‌ی ۷ تا ۸ درصد نگه می‌دارد که نه تنها با محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه‌ای برای آسفالت‌های سرد (۵ تا ۱۲ درصد) مطابقت دارد، بلکه حفره‌های ذخیره‌ای کافی برای جذب انبساط حرارتی قیر در اوج تابستان و جلوگیری از ترک‌های ناشی از فشار داخلی فراهم می‌آورد. حضور یک ناحیه‌ی کران بیشینه مقاومت در چگالی‌های ۲/۴۶۲ تا ۲/۴۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (با مقاومت تقریباً برابر ۲۵۶-۲۵۷ کیلوگرم نیرو) نشان می‌دهد که افزایش صرف چگالی فراتر از ۲/۴۶۲، نه تنها دستاورد مکانیکی

چشمگیری ندارد، بلکه به دلیل کاهش فضای خالی به کمتر از ۷ درصد، خطر تمرکز تنش‌های برشی و خردشدگی تدریجی لبه‌های دانه‌ها را در پی خواهد داشت. بنابراین، در اقلیم هدف، اولویت طراحی باید بر «حداقل تغییرشکل مخرب» و «پایداری حجمی» متمرکز شود؛ از این رو کنترل کران بالای روانی (حداکثر ۴ میلی‌متر) و حفظ فضای خالی در محدوده‌ی ۷-۸ درصد، از دستیابی صرف به اوج مقاومت فشاری مهم‌تر است. نتایج این پژوهش، ضمن ارائه‌ی یک مدل پیش‌بینی‌کننده‌ی معتبر برای رفتار مخلوط سرد سرباره‌ای، چارچوبی علمی برای طراحی بهینه‌ی وصله‌های تعمیری در مناطق گرم و کم‌بارش فراهم می‌آورد و تأکید می‌کند که با کنترل دقیق طرح اختلاط و انتخاب محدوده‌ی قیر پیشنهادی، می‌توان از سرباره‌ی فولادی به‌عنوان جایگزینی پایدار و عملکردی برای سنگدانه‌های طبیعی در مرمت چاله‌ها بهره گرفت؛ هر چند که ارزیابی عملکرد بلندمدت و رفتار در شرایط شبیه‌سازی‌شده‌ی ترافیک و چرخه‌های حرارتی، نیازمند مطالعات تکمیلی در فازهای بعدی این پژوهش خواهد بود.

۶- سپاسگزاری

پژوهش حاضر با عنوان «مطالعه تطبیقی و بررسی فنی کاربرد سنگدانه سرباره‌ای کارخانه فولادسازی در آسفالت ترمیمی» در مرکز پژوهشی حمل‌ونقل پایدار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد و بر اساس قرارداد منعقدۀ با شرکت راه‌سازی فرش‌راه یزد به شماره ۰۴/۲۵۰۶۶/د مهر ۱۴۰۴ انجام پذیرفته است. نگارندگان مراتب قدردانی خود را از حامی مالی پروژه، پیشنهاددهنده موضوع، اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی استان یزد و نیز شرکت‌های تأمین‌کننده مصالح شامل قیر سیامان سازان راه دانش شرق (تأمین قیر امولسیون) و آرش فولاد نگین طوس (تأمین سرباره) ابراز می‌دارند.

۷- مراجع

-Becerra-Duitama, J. A., & Rojas-Avellaneda, D. (2022). Pozzolans: A review. *Engineering & Applied Science Research*, 49(4), 495.
-Dovom, H. A., Kargari, A., Moghaddam, A. M., Kazemi, M., & Fini, E. H. (2024). Self-healing cold mix asphalt containing steel slag: A sustainable approach to cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 482, 144170.

-Amouzadeh Omrani, M. (2023). Laboratory comparison of mechanical properties of emulsified cold recycled asphalt containing cement kiln dust and steel slag with recycled asphalt containing cement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), 57-79.

- Sarkkinen, M., Kujala, K., & Gehör, S. (2019). Modification of Alkali Activated Blast Furnace Slag for Pothole Repairs. *In MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Vol. 274, 04003.
- Tang, Y., Koting, S., Hung, M. K., Md Isa, M. H., & Zhang, H. (2026). Steel Slag in Asphalt Pavements: A Review on Performance, Multifunctional Applications, and Volume Expansion Mitigation Strategies. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-27.
- Yang, J., Ma, R., Dong, B., Ma, H., Wang, Y., Gao, M., & Jin, Y. (2025). Research progress and hotspots of steel slag application in road construction: a bibliometric perspective. *Infrastructures*, 10(3), 54.
- Wang, X., Huang, Y., Geng, L., Li, M., Han, H., Li, K., & Zhang, T. (2023). Multiscale performance of composite modified cold patch asphalt mixture for pothole repair. *Construction and Building Materials*, 371, 130729.
- Ziari, H., Ameri, M., & Khabiri, M. M. (2007). Resilient behaviour of hot mixed and crack sealed asphalt concrete under repeated loading. *Technological and Economic Development of Economy*, 13(1), 56–60.
- Zhang, Ran, Kailu Wang, Long Liang, Jie Ji, and Tansen Gao. (2026). Solvent-Based Cold-Mix Asphalt for Pavement Pothole Repair: Mechanisms, Performance, Challenges, and Future Perspectives. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements* 152, No. 4. 03126003.
- Jakati, S. S., & Kumar, G. S. (2024). Novel cold pothole patching mixtures utilizing EAF steel slag and pyro-oil from municipal plastic solid waste. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(3), 55.
- Hao, Y., Liu, W., Bai, M., Zhang, Z., Zhao, P., Li, H., & Zhao, Z. (2026). A Review of Interfacial Interaction Mechanisms of Steel Slag in Asphalt Concrete: Multi-Scale Characterization and Performance Implications. *Case Studies in Construction Materials*, e06242.
- Manjushree, B. C., & Lokeshwari, M. (2026). A Review on Sustainable Management of Potholes in Flexible Pavements Using Cold-Mix Asphalt Modified with Industrial Waste Materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-19.
- Kumar, G. S., Jakati, S. S., & Ramaraju, H. K. (2023). Developing novel pothole patching mixtures utilizing iron ore waste as substitute to conventional aggregates with anti-stripping agent. *Materials Today: Proceedings*.
- Kumar, G. S., Nitin, G. C., Gurudeep, G., Ujwal, M. S., & Ramaraju, H. K. (2025). State of the art review of mix design parameters on the laboratory performance of cold patching mixtures. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10(1), 51.
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2023). The use of steel slags in asphalt pavements: a state-of-the-art review. *Sustainability*, 15(11), 8817.

Determination of Optimal Binder Range in Cold Asphalt Mixtures Containing Steel Slag Based on Concurrent Analysis of Strength-Flow Ability-Air Voids for Pothole Repair in Warm Climates

Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Mehdi Jokar, Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Fatemeh Karimi, M.Sc., Graduate, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

In the present study, the technical feasibility of utilizing induction furnace steel slag aggregates in cold repair asphalt mixtures was evaluated, with a particular emphasis on determining the optimum bitumen content range and analyzing volumetric-mechanical interactions. To this end, Marshall Specimens were fabricated at five bitumen content levels (ranging from 5.5% to 9.5%). Following a 14-day curing period, the specimens were subjected to Marshall Stability, flow, bulk specific gravity, and air void content tests. The results indicated that Marshall Stability increased with rising bitumen content from 5.5% to 9%, rising from approximately 101 to 257.5 kgf. However, a further increase in bitumen content to 9.5%, despite reducing the air void content to 6.401%, led to a decline in stability to 241.7 kgf. A regression model with a coefficient of determination (R^2) of 98.7% was successfully fitted to the data. The interaction term ($\beta_{12} = -8.4$) indicated a statistically significant negative interaction between bitumen content and air voids. Based on the findings, the optimal bitumen content range was established at 8.5% to 9%. This range simultaneously ensures maximum stability and adequate flow (3.8 to 4 mm), maintains air voids within the 7% to 8% range, and provides favorable conditions for thermal expansion and secondary compaction under the target climatic conditions. Flow analysis demonstrated a consistently increasing trend across the entire bitumen content spectrum, from 2.83 to 4.28 mm, which was predominantly governed by the thickness of the bitumen film. Furthermore, the presence of an upper threshold for maximum stability was confirmed within the density range of 2.462 to 2.485 g/cm³, indicating that increasing the density beyond this limit does not result in a significant improvement in stability.

Keywords: Cold Asphalt Mixture, Steel Slag, Pothole Repair, Response Surface Methodology, Warm and Arid Climate