

مقایسه ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی متراکم و مخلوط ماستیک درشت‌دانه

مقاله علمی - پژوهشی

محمد نام‌آور جهرمی، دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
علیرضا سرکار*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
احمد منصوریان، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
آرمین اسمعیل زاغی، استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sarkar@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

صفحه ۱۴۵-۱۵۸

چکیده

این مطالعه باهدف مقایسه خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و مخلوط ماستیک درشت‌دانه (میان‌تهی) انجام شده است. در این راستا، برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰، مصالح سنگی آهکی و فیلر استفاده شد. آزمایش‌های مکانیکی و عملکردی شامل پایداری مارشال، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی، خستگی و شکست در دمای پایین روی مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته و مخلوط ماستیک درشت‌دانه انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در آزمایش‌های پایداری مارشال، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، خستگی و شکست در دمای پایین عملکرد بهتری نسبت به مخلوط ماستیک درشت‌دانه دارد. با این حال، در دماهای بالا، عملکرد مخلوط ماستیک درشت‌دانه بهتر از مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته است. براساس نتایج، پایداری مارشال مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته حدود ۳۰ درصد بیشتر از نمونه‌های میان‌تهی است. همچنین، مدول برجهندگی این مخلوط‌ها ۲۷ درصد بیشتر از مخلوط‌های میان‌تهی است. به علاوه، به دلیل تماس سنگدانه به سنگدانه در مخلوط ماستیک درشت‌دانه، این مخلوط‌ها مقاومت بالاتری در برابر تنش‌های فشاری دارند و در نتیجه مقاومت آن‌ها در برابر شیارشدگی حدود ۴۵ درصد بیشتر از مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته است. در نهایت، عمر خستگی مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته بیش از دو برابر عمر خستگی مخلوط ماستیک درشت‌دانه است.

واژه‌های کلیدی: دانه‌بندی متراکم، شکست، شیارشدگی، مخلوط ماستیک درشت‌دانه، میان‌تهی

۱- مقدمه

معمولاً نفوذناپذیرترین نوع است که نسبت به مخلوط‌های با دانه‌بندی باز و میان‌تهی، درصد قیر کمتری دارد. مخلوط ماستیک درشت‌دانه (SMA) نوعی آسفالت داغ با دانه‌بندی میان‌تهی است که شامل سنگدانه‌های درشت، قیر، فیلر (پرکننده)، بخش ریزدانه و افزودنی‌های خاص می‌شود. این نوع مخلوط در دهه ۱۹۶۰ در آلمان، به‌منظور افزایش پایداری و مقاومت در برابر

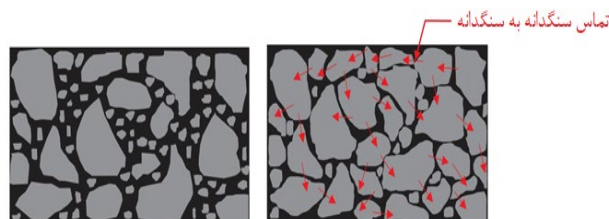
مخلوط آسفالتی داغ (HMA) به‌عنوان پرکاربردترین نوع روسازی در سطح جهانی شناخته می‌شود. دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده‌شده در تولید این مخلوط‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن‌ها دارد. مخلوط‌های آسفالتی داغ بر اساس نوع دانه‌بندی به سه گروه تقسیم می‌شوند: دانه‌بندی پیوسته، باز و میان‌تهی. از این سه نوع، مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته (DG) رایج‌ترین و

Le, Nguyen, (2023). مطالعه لی و همکاران (Hadidy, 2023).
 Nguyen, & Nguyen, 2022) نیز نشان داد که از نظر مدول
 دینامیکی و مقاومت در برابر شیارشدگی، مخلوط SMA
 عملکرد بهتری نسبت به مخلوط DG دارد. برخی محققان
 معتقدند که مخلوط SMA نسبت به DG حساسیت بیشتری به
 آسیب‌های رطوبتی دارد. در واقع، آن‌ها اشاره کرده‌اند که در
 مخلوط‌های SMA، آب می‌تواند به راحتی از ساختار مخلوط
 عبور کرده و باعث می‌شود پوشش قیری سنگدانه‌ها بیشتر در
 معرض رطوبت قرار گیرد، که این امر می‌تواند منجر به افزایش
 حساسیت به رطوبت شود (Wang & Wang, 2011).
 پژوهشی دیگر نشان داد که مخلوط SMA در مقایسه با DG
 عملکرد بهتری در برابر شیارشدگی و ترک خوردگی از بالا به
 پایین، پایین به بالا و ترک حرارتی از خود نشان می‌دهد (Wu,
 Wen, Chaney, Littleton, & Muench, 2017).
 همچنین، در پژوهشی توسط وایت و ابوالسعید (White &
 Abouelsaad, 2024)، هوازدگی آسفالت ماستیکی سنگی با
 آسفالت متراکم دانه‌بندی شده طی ۹۸ روز پیرشدگی تسریع شده
 در آزمایشگاه مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه
 تفاوت‌هایی در پیرشدگی و مدول مخلوط‌ها وجود دارد، اما
 SMA به دلیل حجم بیشتر قیر، عملکرد بهتری از خود نشان
 می‌دهد. در نهایت، مشخص شد که عمر مفید SMA در باند
 فرودگاه حدود چهار سال بیشتر از DG است.
 در مطالعه‌ای دیگر، رابطه بین تنش و ضخامت روسازی با استفاده
 از تحلیل رگرسیون در دوازده مدل عددی بررسی شد. نتایج نشان
 داد که روسازی‌های SMA از استحکام، نفوذناپذیری و ساختار
 همگن بالاتری برخوردارند و در مقایسه با روسازی‌های DG،
 در برابر سایش و تغییر شکل پلاستیکی مقاوم‌تر هستند
 (Selsal, Karakas, & Sayin, 2022). همچنین، اقبالی و
 همکاران (Eghbali, Tafti, Aliha, & Motamedi, 2019)
 در پژوهشی نشان دادند که مخلوط‌های SMA مقاومت
 به شکست کمتری نسبت به مخلوط‌های DG دارند که این امر
 نیاز به اصلاحات بیشتر در ترکیب این مخلوط‌ها را مطرح می‌کند.
 در سال ۲۰۱۷، مطالعه‌ای دو نوع مخلوط با دانه‌بندی پیوسته و
 میان‌تهی را ارزیابی کرده و سیستم جدیدی برای نظارت بر عمق
 شیار در لایه‌های روسازی تحت بارگذاری APT ارائه داد. نتایج
 نشان داد که مخلوط‌های SMA نسبت به DG مقاومت بیشتری
 در برابر شیارشدگی دارند (Tian, Lee, Nantung, &

شیارشدگی در بزرگراه‌ها توسعه یافت و سپس به سرعت در
 ایالات متحده و سایر نقاط جهان گسترش یافت (Brown &
 Manglorkar, 1993). SMA به دلیل ساختار پایدار
 سنگدانه‌ها، در برابر تغییر شکل بسیار مقاوم بوده و بارهای وارده
 را از طریق تماس مستقیم سنگدانه‌ها به صورت یکنواخت توزیع
 می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که با افزایش مقدار سنگدانه‌های
 درشت، تماس بین آن‌ها بیشتر شده و شبکه‌ای پایدار برای توزیع
 بار تشکیل می‌شود. (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰). طبق معیارهای طراحی
 و ارزیابی مخلوط‌های ماستیک درشت‌دانه (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹)،
 حداکثر اندازه مصالح درشت‌دانه در این مخلوط ۲۵ میلی‌متر
 است، اما معمولاً بین ۱۲/۵ تا ۱۹ میلی‌متر انتخاب می‌شود. این
 مخلوط به عنوان یک لایه مقاوم و بادوام در برابر شیارشدگی برای
 مناطق با تنش‌های بالا، مانند شیب‌های تند یا مسیرهایی با بار
 محوری زیاد، پیشنهاد می‌شود (Raya, 2008). به دلیل وجود
 فضای خالی زیاد بین مصالح سنگی درشت‌دانه و مصرف نسبتاً
 بالای قیر، یکی از چالش‌های این مخلوط، ریزش قیر در حین
 ذخیره‌سازی و حمل است. بنابراین، استفاده از الیاف به عنوان
 تثبیت‌کننده برای جلوگیری از این مشکل ضروری است.
 (Nunn, 1994). الیاف همچنین باعث افزایش ضخامت
 پوشش قیری و کاهش اکسیداسیون قیر می‌شود. تفاوت مخلوط
 آسفالتی SMA و مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در شکل
 ۱ نشان داده شده است. در مقایسه با آسفالت‌های متراکم (DG)،
 مخلوط SMA عملکرد بهتری برای جاده‌های پرتردد و با
 سرعت بالا ارائه می‌دهد. این مخلوط سطحی صاف و کم‌صدا
 ایجاد می‌کند که دارای بافت کافی برای افزایش ایمنی، کاهش
 پاشش آب و مهار اسپری ناشی از عبور خودروها و همچنین
 ایجاد مقاومت اصطکاکی مناسب است. مقدار بیشتر قیر در این
 مخلوط، دوام، پایداری و توان تحمل بارهای ترافیکی سنگین‌تر
 را افزایش می‌دهد (Rebecchi & Sharp, 2009). از این رو،
 در سطح جهانی، SMA به عنوان یک رویه آسفالتی با کیفیت و
 انعطاف‌پذیر شناخته می‌شود که از نظر استحکام، طول عمر و
 بازگشت سرمایه عملکرد مطلوبی دارد، هرچند هزینه اولیه آن
 بالاتر است (Rebecchi & Sharp, 2009).
 نتایج آزمایش‌های عملکردی نشان داد که مخلوط‌های DG در
 مقایسه با SMA، پایداری مارشال بیشتری دارند، اما مخلوط
 SMA در آزمایش‌های استحکام کششی غیرمستقیم و تغییر
 شکل، عملکرد بهتری از خود نشان داد (Rashed & Al-

گسسته انتخاب و با روش اصلاح شده آزمون لاتمن ارزیابی شدند. تحلیل داده‌ها با روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد و مدلی ریاضی برای پیش‌بینی پتانسیل جداشدگی مخلوط بر اساس مقدار قیر و دانه‌بندی ارائه گردید. نتایج نشان داد که مخلوط ماستیک درشت‌دانه مقاومت بهتری در برابر رطوبت دارد.

(Haddock, 2017). حق‌شناس و همکاران (Haghshenas, Khodaii, Hossain, & Gedafa, 2015) در پژوهشی، پتانسیل جداشدگی قیر و سنگدانه در حضور آب را در دو مخلوط با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی بررسی کردند. برای این منظور، سه نوع سنگدانه با دانه‌بندی متراکم و سه نوع با دانه‌بندی



شکل ۱. مخلوط ماستیک درشت دانه (سمت راست)، مخلوط آسفالتی با دانه بندی پیوسته (سمت چپ)

کشش غیرمستقیم و شکست در دمای پایین انجام شده است. این تحقیق با ارائه داده‌های جدید و تحلیل‌های دقیق‌تر، به دنبال ارائه شناختی بهتر از رفتار این دو نوع مخلوط در شرایط مختلف محیطی و بارگذاری است.

مطالعه انجام شده توسط ابراهیم آسی (Asi, 2006) نشان داد که اگرچه مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته دارای مقاومت فشاری و کششی بیشتری هستند، اما مخلوط‌های SMA از دوام و خاصیت ارتجاعی بهتری برخوردارند. همچنین، اگرچه برتری SMA در مقاومت در برابر شیارشدگی در آزمایش‌های آزمایشگاهی اثبات نشد، اما عملکرد میدانی آن این برتری را تأیید می‌کند. در نتیجه، مخلوط‌های SMA به دلیل دوام بالاتر، خاصیت ارتجاعی بهتر و مقاومت در برابر شیارشدگی، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم، نسبت به مخلوط‌های متراکم معمولی برتری دارند. باتوجه‌به اینکه تاکنون مطالعات جامع و کاملی در زمینه مقایسه عملکرد مکانیکی مخلوط‌های SMA و DG در شرایط دمایی مختلف انجام نشده است، این پژوهش باهدف بررسی و مقایسه دقیق‌تر این دو نوع مخلوط در دماهای مختلف (پایین، متوسط و بالا) از طریق مجموعه‌ای از آزمایش‌های مکانیکی و عملکردی از جمله آزمایش‌های پایداری مارشال، مدول برجهنگی، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی، خستگی به روش

۲- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱- قیر

در این مطالعه از قیر خالص با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ (معادل PG 58-22) استفاده گردیده است که بیشتر در نواحی سردسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و جزئیات آن در جدول ۱ ذکر شده است.

همچنین با توجه به خروجی آزمایش مارشال (ASTM D1559)، درصد قیر بهینه برای مخلوط SMA و DG به ترتیب ۴/۸ و ۶ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی تعیین گردید.

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده

مشخصات استاندارد		نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیر
حداکثر	حداقل		AASHTO	ASTM	
		۱/۰۱۶	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۵۲	۴۵	۴۵/۸	T53	D36	نقطه نرمی (گلوله - حلقه) بر حسب درجه سلسیوس
۱۰۰	۸۵	۹۱	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه)
-	۱۰۰	>۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
-	۹۹	۹۹/۹۲	T44	D2042	حلالیت در تترا کلرید کربن
-	۲۳۲	۳۳۲	T48	D92	درجه اشتعال سلسیوس
۰/۸		۰/۳	T179	D1754	لعب نازک قیر (۱۶۰°C- پنج ساعت)

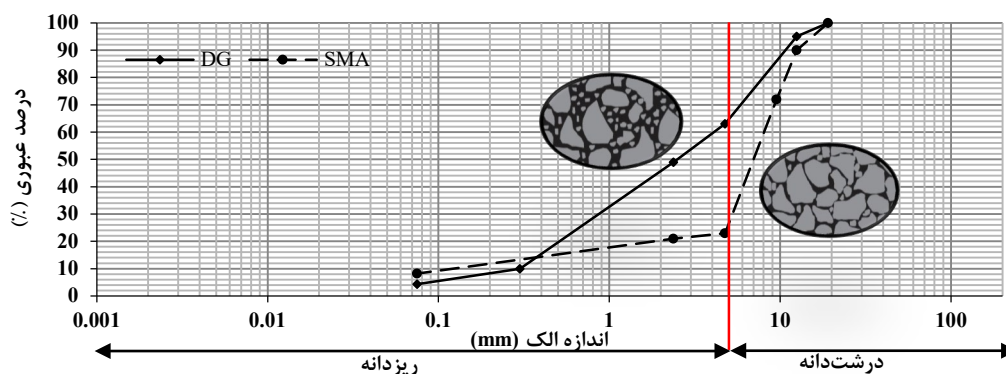
۲-۲- مصالح سنگی

مصرفی در این پژوهش مطابق جدول ۲ است. همچنین دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش برای تهیه مخلوط با دانه‌بندی پیوسته و مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه بر اساس حدود مشخصات دانه‌بندی جدول ۹-۱ شماره ۴ (توپکا ۱۹-۰) و جدول ۱۳-۳ (آسفالت ماستیک درشت‌دانه ۱۹-۰) نشریه شماره ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران است که در شکل ۲ آورده شده است.

مصالح مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و همچنین آسفالت ماستیک درشت‌دانه، از جنس مصالح آهکی بوده که از سنگ‌شکن شرکت زرین سپاهان، واقع در کیلومتر پنج زرین‌شهر استان اصفهان تهیه شده است. مصالح سنگی که برای ساخت انواع مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌روند باید دارای حداقل مشخصات فنی تعیین شده توسط AASHTO و ASTM باشند. مشخصات مصالح

جدول ۲. خصوصیات فنی مصالح سنگی

خصوصیات فنی مصالح درشت‌دانه				
آزمایش	روش آزمایش	حداکثر	حداقل	نتایج آزمایش
سایش لس آنجلس (%)	ASTM C131	۳۰	-	۲۶
افت وزنی در سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۸	-	۰/۶۰
درصد شکستگی (مانده روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر)	ASTM D 5821	۱۰۰/۱۰۰	-	۱۰۰
درصد دانه‌های سوزنی و پولکی (مانده روی الک ۹/۵ میلی‌متر)	ASTM D4791	۱۵	-	۹
جذب آب (%)	AASHTO T85	۲/۸	-	۰/۸
وزن مخصوص ظاهری	AASHTO T85	-	-	۲/۷۰۳
مشخصات فنی مصالح ریزدانه				
شاخص خمیری	ASTM D4318	NP	NP	NP
افت وزنی در سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۱۲	-	۱/۹
ارزش ماسه‌ای (%)	ASTM D 2419	-	۵۰	۵۳
جذب آب (%)	AASHTO T85	۲/۸	-	۱/۵
وزن مخصوص ظاهری	AASHTO T85	-	-	۲/۷۲۵
مشخصات فنی مصالح فیلر				
وزن مخصوص ظاهری	ASTM C188	-	-	۲/۷۴۲



شکل ۲. منحنی دانه بندی مخلوط با دانه‌بندی پیوسته و مخلوط ماستیک درشت‌دانه

سلولزی در مخلوط SMA باید ۰/۳ درصد وزن مخلوط باشد. در این مطالعه از الیاف سلولزی به مقدار ۰/۳ درصد استفاده شده است.

برای جلوگیری از بروز پدیده ریزش قیر در مخلوط SMA، از الیاف سلولزی استفاده شد. بر اساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴)، حداقل میزان الیاف

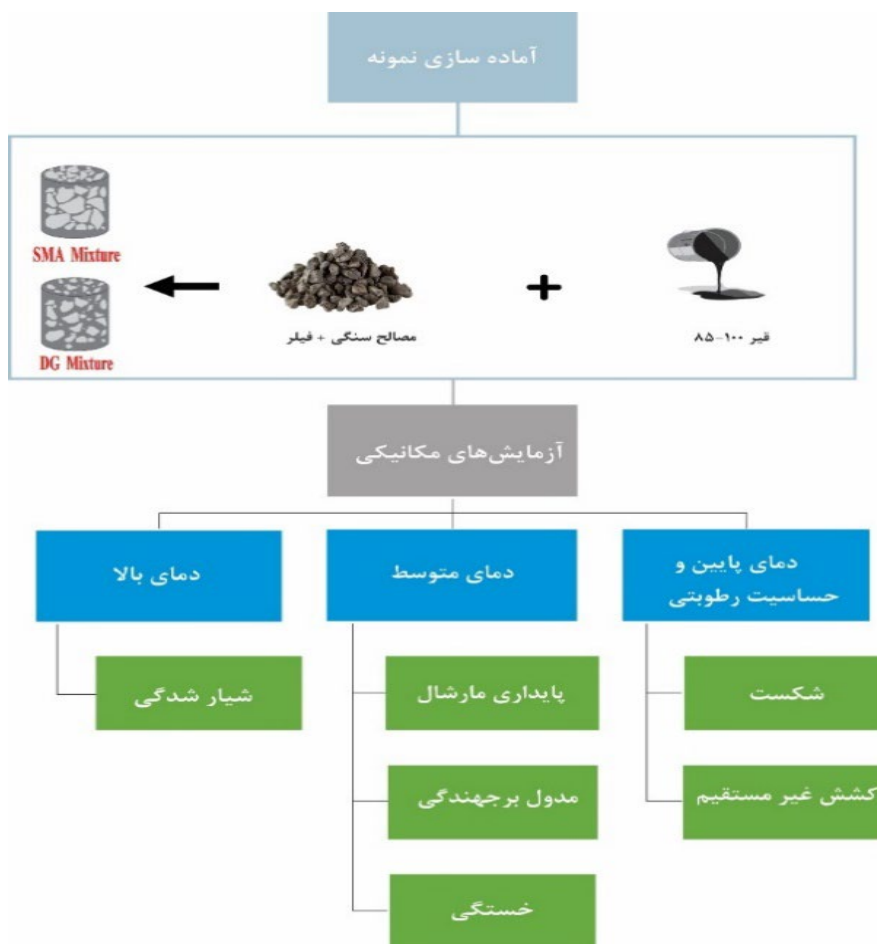
۳- روش‌ها

شد. استحکام مارشال، حداکثر باری است که مخلوط آسفالتی قبل از شکسته شدن می‌تواند تحمل کند، در حالی که روانی به میزان تغییر شکل نمونه در لحظه شکست یا میزان وارفتن آن اشاره دارد. جهت انجام آزمایش، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای شکل به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از آن، نمونه‌ها از آب خارج شده و در فک مارشال قرار گرفتند. سپس با نرخ بارگذاری ۵/۸۰ میلی‌متر بر دقیقه تحت فشار قرار گرفتند تا به لحظه گسیختگی برسند. در نهایت، بیشترین نیروی لازم جهت گسیختگی نمونه ثبت شد.

برای مقایسه مخلوط آسفالتی DG و SMA آزمون‌های پایداری مارشال، مدول ارتجاعی، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی، خستگی کششی غیرمستقیم و آزمایش شکست در دمای پایین روی نمونه‌ها انجام شد. شکل ۳ روند آماده سازی نمونه‌ها آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۱- آزمایش پایداری مارشال

جهت ارزیابی پایداری و روانی مخلوط‌های DG و SMA، آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM-D1559 انجام

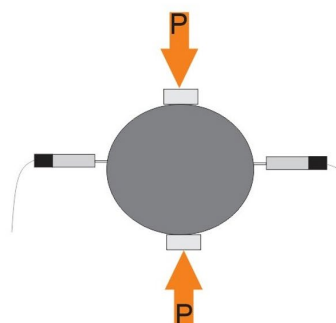


شکل ۳. فرآیند آماده سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

۲-۳- آزمایش مدول برجهندگی

از شکل بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس یک هرتز، سیکل بارگذاری یک ثانیه (مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه و مدت زمان استراحت ۰/۹ ثانیه) و ضریب پواسون ۰/۳۵ استفاده گردید. شکل ۴ شماتیک دستگاه و نمونه در حال انجام آزمون مدول برجهندگی را نشان می‌دهد.

آزمایش مدول برجهندگی به خوبی رفتار غیرالاستیک مخلوط را در مقابل بار توصیف می‌نماید. همچنین این توصیف خوب، منجر به طراحی روسازی راه بر اساس عملکرد واقعی لایه در زیر بار خواهد شد (Aboutalebi Esfahani & Namavar, 2020). این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و مطابق استاندارد ASTM D4123 انجام شد. در این آزمایش

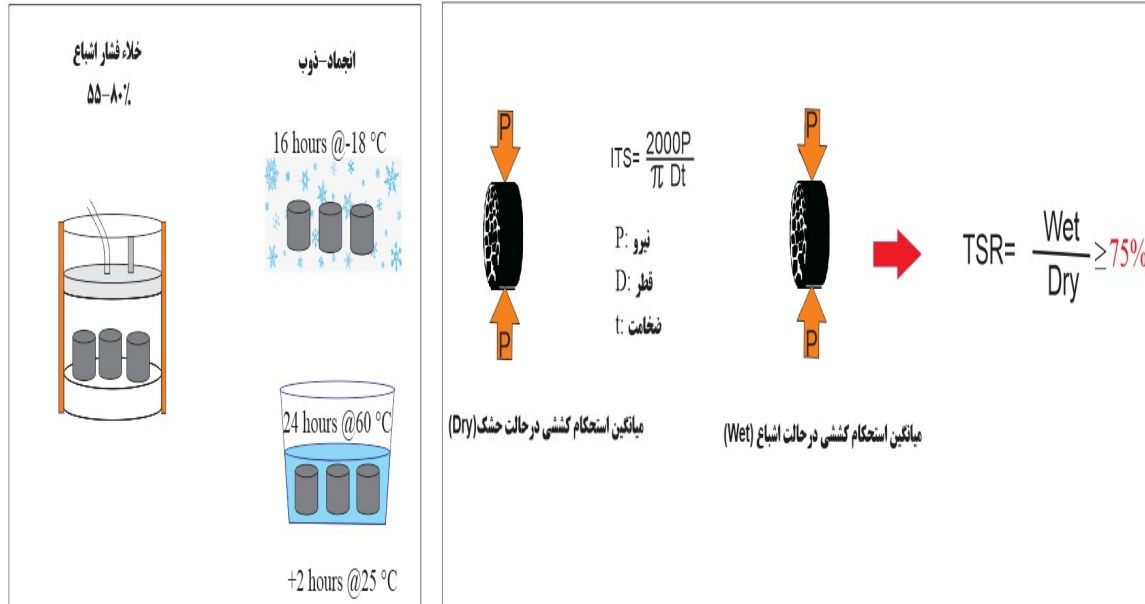


شکل ۴. شماتیک دستگاه و نمونه در حال آزمایش مدول برجهندگی

۳-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی

ابتدا نمونه‌ها به سطح اشباع ۷۰ الی ۸۰ درصد رسیده و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سلسیوس و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری می‌شوند. پس از آن، همه نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده می‌شوند. سپس آزمایش کشش غیرمستقیم با اعمال بارگذاری با نرخ ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌گیرد. فرایند انجام آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.

از بین رفتن و یا کاهش پیوند بین قیر و سطح مصالح سنگی در حضور رطوبت، به جریان شدن دانه‌ها و همچنین از بین رفتن یکپارچگی بتن آسفالتی منجر می‌شود. در این پژوهش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها از آزمایش کشش غیرمستقیم بر اساس استاندارد AASHTO T-283 استفاده گردید. مطابق استاندارد، نسبت مقاومت کششی نمونه اشباع به خشک باید بیش از ۷۵ درصد باشد. در این آزمایش ابتدا نمونه‌ها به دو دسته خشک و اشباع تقسیم می‌گردد. به منظور اعمال شرایط اشباع،

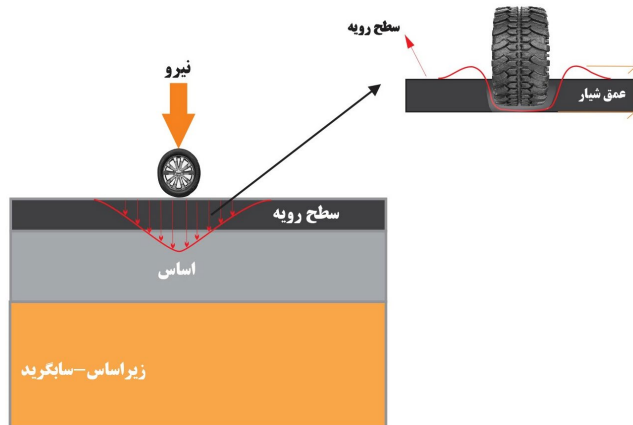


شکل ۵. فرایند انجام آزمایش حساسیت رطوبتی

۳-۴- آزمایش شیارشدگی

و پهنای چرخ به ترتیب ۲۰ و ۵ سانتی متر که با سرعتی برابر با ۵۰ عبور در دقیقه، بر روی نمونه حرکت می‌کند، انجام شد. بار چرخ برابر ۷۰۰ نیوتن و عمق شیار پس از ۱۰۰۰۰ حرکت رفت و برگشت چرخ، اندازه‌گیری شد. شکل ۶ مکانیسم شیارشدگی را نشان می‌دهد.

آزمایش شیارشدگی با استفاده از دستگاه شیار افتادگی ویل تراک هامبورگ، جهت ارزیابی عملکرد روسازی در دمای بالا انجام شد. این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T324 روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵ و ۶ سانتی متر در دمای ۵۵ درجه سلسیوس با استفاده از چرخ بارگذاری با قطر



شکل ۶. مکانیسم شیارشدگی در روسازی

۳-۵- خستگی کشش غیرمستقیم

کشش غیر مستقیم استفاده شد. این آزمایش بر اساس استاندارد EN12697-24 و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در سه سطح تنش ۲۰۰ و ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال (Jahromi, Sarkar, Mansourian, & Zaghi, 2025) روی نمونه با قطر و

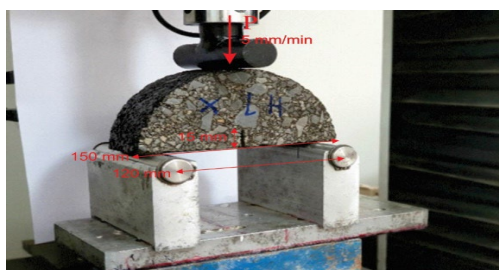
خستگی عمده‌ترین مشکلات مخلوط‌های آسفالتی در دمای میانی است که به علت تکرار بارگذاری اتفاق می‌افتد (Sabouri, Mirzaiyan, & Moniri, 2018). در این پژوهش جهت بررسی خستگی مخلوط‌های آسفالتی از روش

آزمایش بارگذار خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای (SCB) با کمک دستگاه UTM استفاده گردید. در این آزمایش نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار با قطر و ضخامت به ترتیب ۱۵ سانتی‌متر و ۳ سانتی‌متر با ترک به عمق ۱۵ میلی‌متر بر اساس استاندارد AASHTO TP 105-13 تحت بارگذاری خمشی با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه در سه دمای ۰، -۱۰ و -۲۰ درجه سانتی‌گراد (Jahromi et al., 2025) تحت آزمایش قرار گرفتند. شکل ۷ نمونه SCB، موقعیت تکیه‌گاه‌ها، محل اعمال بار و روند انجام آزمایش تا شکسته شدن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

ارتفاع به ترتیب ۱۰۰ و ۶۵ میلی‌متر انجام گرفت. هر سیکل بارگذاری در این آزمایش برابر ۰/۵ ثانیه بود که ۰/۱ ثانیه برای بارگذاری و ۰/۴ برای استراحت در نظر گرفته شد.

۳-۶- آزمایش شکست در دمای پایین

یکی از آزمایش‌های رایج مکانیک شکست، آزمایش بارگذاری خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای است که در آن نمونه نیم‌دایره‌ای ترک‌دار در معرض بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد. جهت بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای پایین، از



شکل ۷. نمونه SCB

& Akhondi, 2016; Amirdehi, Aliha, Moniri, & Torabi, 2019). این پارامتر با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید (Lim, Johnston, & Choi, 1993).

چقرمگی شکست مود ۱ (KIC) به‌عنوان معیار مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های آسفالتی در دماهای منفی تعریف می‌شود که در آن رفتار الاستیک در مخلوط آسفالتی غالب است و شرایط شکست الاستیک خطی برآورده می‌شود (Aliha, Bahmani, & Akhondi, 2016).

$$k_{IC} = \frac{F_{cr}}{2Rt} Y_I \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$Y = 4.782 - 1.219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0.063 \exp \left(7.045 \left(\frac{a}{r} \right) \right)$$

و $Y_{I(0.8)}$ پارامتر بدون بعدی است که از تحلیل اجزا محدود بدست آمده و وابسته به طول ترک و شعاع نمونه می‌باشد.

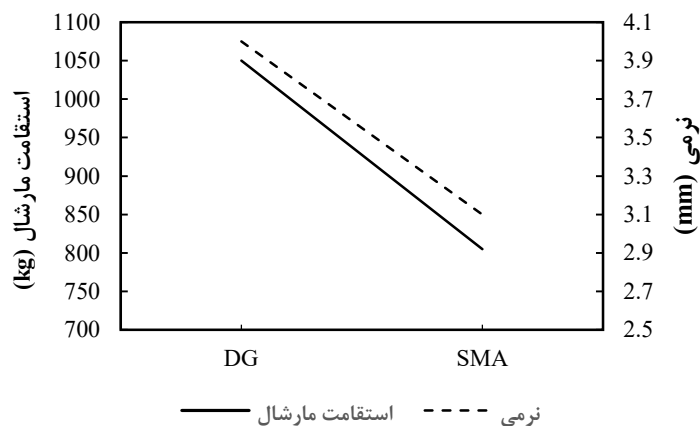
که در آن F_{cr} بار بحرانی بر حسب نیوتن، r شعاع نمونه بر حسب متر، t ضخامت نمونه بر حسب متر، a طول ترک بر حسب متر

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش پایداری مارشال

پیوسته می‌باشد. این تفاوت به دلیل دانه‌بندی متراکم سنگدانه‌ها در مخلوط‌های DG است. با توجه به سرعت بارگذاری بالا در آزمایش مارشال، شاخص‌های پایداری و روانی به ترتیب معیاری برای انسجام و اصطکاک داخلی مخلوط‌ها به شمار می‌آیند.

شکل ۸ پایداری و روانی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که پایداری مارشال مخلوط‌های DG به‌طور چشمگیری (حدود ۳۰ درصد) بیشتر از نمونه‌های SMA است. همچنین، روانی مارشال در مخلوط‌های SMA کمتر از مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی

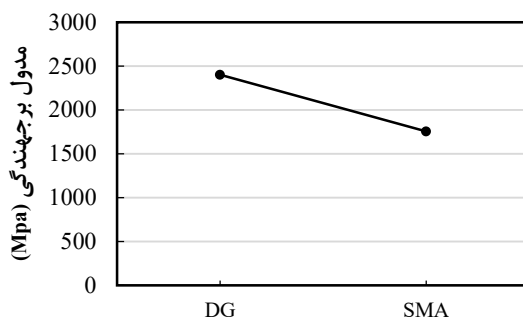


شکل ۸. نتایج استقامت مارشال و نرمی مارشال

۲-۴- مدول برجهندگی

متراکم‌تر است (Muniandy & Huat, 2006). نتایج این پژوهش هم‌راستا با نتایج مطالعه مقدس‌نژاد و همکاران (Nejad, Aflaki, & Mohammadi, 2010) می‌باشد. مطالعه مقدس‌نژاد و همکاران نشان داد که مدول سفتی مخلوط DG بیشتر از SMA است.

شکل ۹ نتایج آزمون مدول برجهندگی مخلوط DG و SMA را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که مقدار مدول برجهندگی مخلوط DG، ۲۷ درصد بیشتر از مخلوط SMA می‌باشد. در واقع به دلیل اینکه دانه‌بندی سنگدانه‌ها در مخلوط DG پیوسته و توپیر است، استخوان بندی مخلوط حاصله

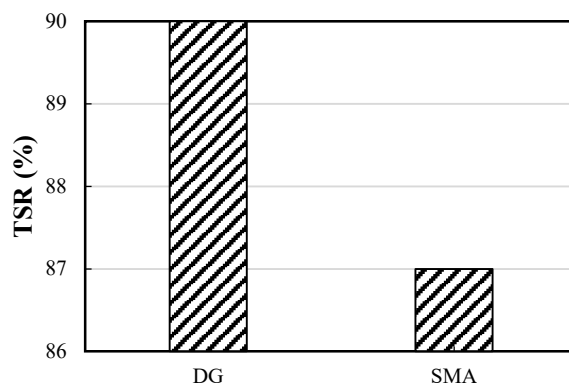


شکل ۹. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

۳-۴- حساسیت رطوبتی

راحتی در ساختار مخلوط حرکت کند، که باعث می‌شود پوشش قیر روی سنگدانه‌ها بیشتر از مخلوط DG در معرض رطوبت قرار گیرد. این وضعیت می‌تواند حساسیت مخلوط SMA به رطوبت را افزایش دهد (Wang & Wang, 2011).

نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های DG و SMA در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به دانه‌بندی میان‌تهی در مخلوط SMA، مقاومت این مخلوط در برابر آسیب‌های رطوبتی کمتر از مخلوط DG است. دلیل این تفاوت را می‌توان اینگونه بیان کرد که در مخلوط‌های SMA، آب قادر است به

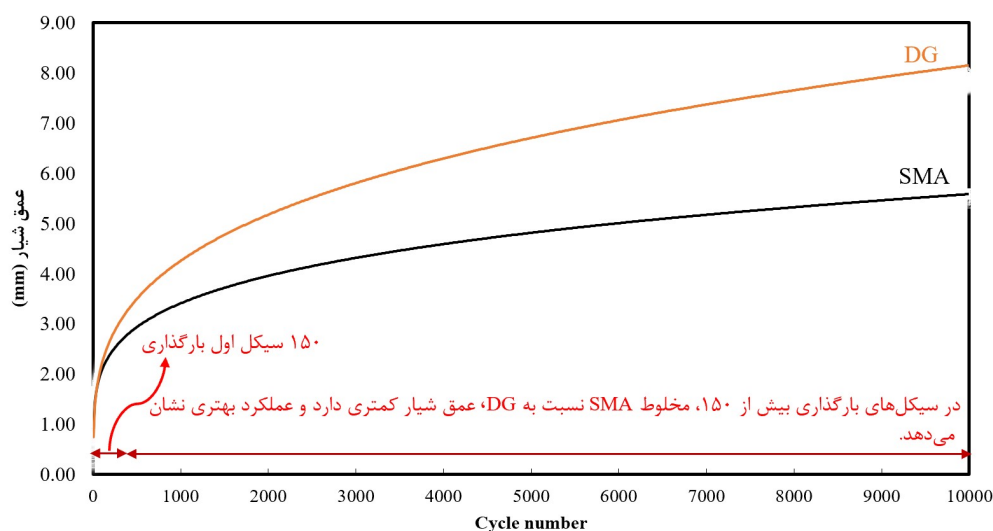


شکل ۱۰. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

۴-۴- آزمایش شیارشدگی

است. در واقع، مقاومت مخلوط SMA در برابر شیارشدگی حدود ۴۵ درصد بیشتر از مخلوط DG است. این تفاوت به دلیل نحوه توزیع و تعامل سنگدانه‌ها در مخلوط SMA است که موجب بهبود عملکرد آن در برابر بارهای وارده می‌شود (Jahromi & Sarkar, 2025).

نتایج آزمایش شیارشدگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج و با توجه به تماس سنگدانه به سنگدانه در مخلوط SMA، تاب سنگدانه‌ها در برابر تنش‌های فشاری افزایش یافته و در نتیجه، مقاومت این مخلوط در برابر شیارشدگی نسبت به مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته بیشتر

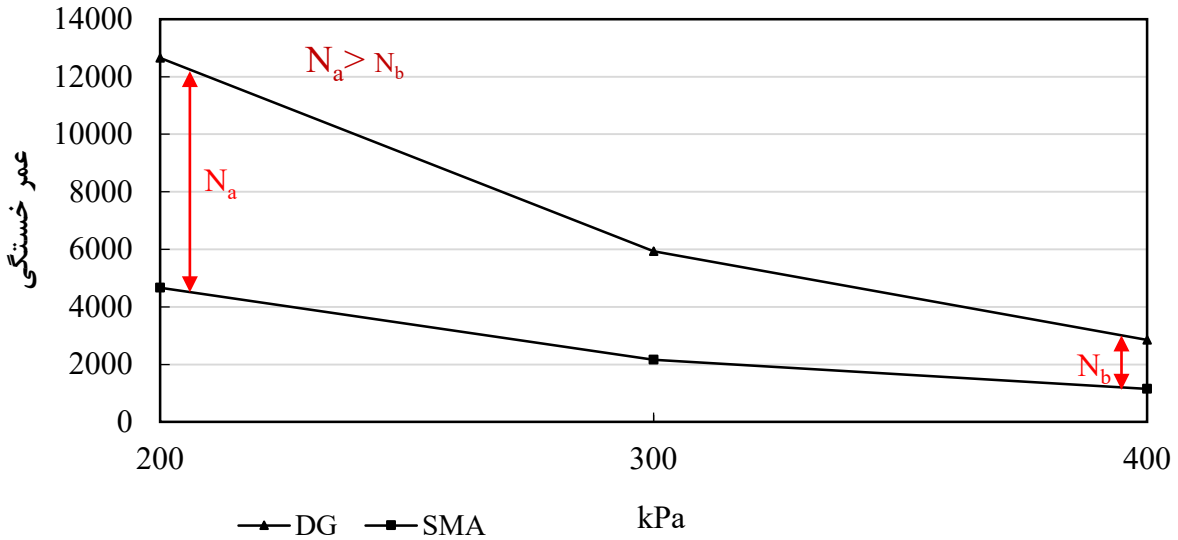


شکل ۱۱. نتایج آزمایش شیار شدگی

۴-۵- آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

بر این، نتایج نشان می‌دهند که مخلوط DG نسبت به تغییرات سطح تنش حساس‌تر است. این یافته‌ها با مطالعات مقدس‌نژاد و همکاران (Nejad et al., 2010) هم‌راستا است که نشان می‌دهند عمر خستگی مخلوط DG بیشتر از SMA است. به طور کلی، مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی گسسته معمولاً به‌عنوان مخلوط‌های ضعیف در برابر مقاومت خستگی شناخته می‌شوند (Muniandy & Huat, 2006).

شکل ۱۲ نتایج آزمایش خستگی کشش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، عمر خستگی مخلوط‌های DG بیش از دو برابر عمر خستگی مخلوط‌های SMA است. این تفاوت به ساختار متراکم و پیوسته مخلوط‌های DG و درهم‌تنیدگی بیشتر سنگدانه‌ها در آن‌ها نسبت به مخلوط‌های SMA که دارای دانه‌بندی میان‌تهی و تماس سنگدانه به سنگدانه است، نسبت داده می‌شود. این ویژگی‌ها موجب می‌شود مخلوط DG در برابر تنش‌های کششی مقاوم‌تر باشد و به تبع آن، رفتار خستگی بهتری نشان دهد. علاوه

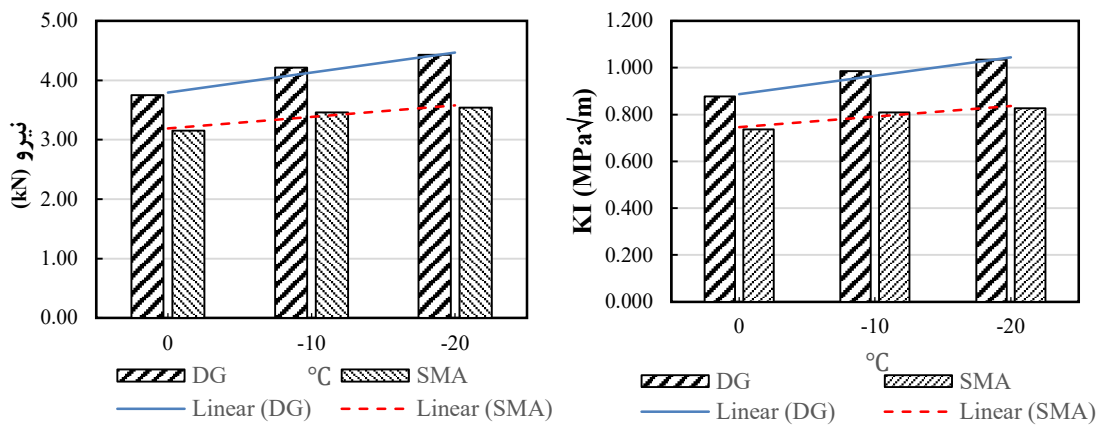


شکل ۱۲. نتایج آزمایش خستگی

۴-۶- آزمایش شکست در دمای پایین

شکل ۱۳ نتایج آزمایش SCB را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، در هر دو مخلوط، دما و بار وارد شده برای شکست کامل نمونه‌ها رابطه معکوس دارند. به طوری که با کاهش دما، بار مورد نیاز برای شکستن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که اثر دما بر روند شکست تمامی نمونه‌های ترک خورده مشابه است. مقادیر بحرانی فاکتور شدت تنش، تحت مود ۱ بارگذاری برای نمونه‌های آسفالت به ازای ترک به طول ۱۵ میلی‌متر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج در هر دو نوع مخلوط، با کاهش دما، فاکتور شدت تنش (چقرمگی شکست) افزایش می‌یابد. علت این پدیده را اینگونه می‌توان عنوان کرد که با کاهش دما، کند روانی قیر افزایش می‌یابد؛ بنابراین نیروی بیشتری برای ایجاد شکست در قیر باید اعمال شود (Namavar Jahromi, Sarkar,)

(Mansourian, & Esmaeil Zaghi, 2024). با توجه به اینکه ضریب شدت تنش بحرانی، نسبت مستقیم با مقدار بار شکست دارد، در نتیجه با کاهش دما، چقرمگی شکست افزایش خواهد یافت. البته این نکته را نیز باید در نظر داشت که کاهش زیاد دما می‌تواند به بروز ترک‌های ریز در مخلوط آسفالتی و در نتیجه کاهش مقاومت آن منجر شود. همچنین با توجه به نتایج می‌توان عنوان نمود که مقاومت ترک خوردگی نمونه DG بیشتر از نمونه SMA می‌باشد. این رفتار را می‌توان به در هم‌بستگی بهتر بین سنگدانه‌ها در مخلوط‌های DG نسبت به مخلوط‌های SMA و همچنین به محتوای بالاتر قیر اعمال شده در مخلوط‌های نسبت داد. این نتایج با مطالعه اقبالی و همکاران در یک راستا است (Eghbali et al., 2019).



شکل ۱۳. نتایج آزمایش شکست در دمای پایین (بالا) و شدت تنش بحرانی (پایین)

۵- نتیجه گیری

DG است. به دلیل تماس سنگدانه به سنگدانه در مخلوط SMA، تاب آن‌ها در برابر تنش‌های فشاری افزایش و در نتیجه مقاومت آن‌ها در برابر شیارشدگی بیشتر از مخلوط DG است. عمر خستگی در مخلوط‌های DG بیش از دو برابر عمر خستگی در مخلوط‌های SMA است. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین در نمونه‌های DG بیشتر از نمونه‌های SMA است.

به‌طورکلی، می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط آسفالتی DG در آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، خستگی و شکست در دمای پایین عملکرد بهتری نسبت به مخلوط SMA دارد. با این حال، مخلوط SMA در برابر شیارشدگی عملکرد بهتری از DG نشان داده است.

این مطالعه با هدف مقایسه و ارزیابی خصوصیات مکانیکی و عملکردی مخلوط‌های DG و SMA انجام شده است. برای این منظور، خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های پایداری مارشال، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی، خستگی و شکست در دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عمده این تحقیق به شرح زیر است:

نتایج آزمون مارشال نشان داد که استحکام مارشال نمونه‌های DG به دلیل دانه‌بندی متراکم مصالح سنگی، به طور چشمگیری از نمونه‌های SMA بالاتر است. نتایج نشان داد که مدول برجهندگی مخلوط DG از مخلوط SMA بالاتر است. این امر به دلیل دانه‌بندی پیوسته و توپر در مخلوط DG است که باعث می‌شود استخوان‌بندی مخلوط متراکم‌تر گردد.

باتوجه به میان‌تهی بودن دانه‌بندی در مخلوط SMA، مقاومت این نوع مخلوط در برابر آسیب‌های رطوبتی کمتر از مخلوط

۶- مراجع

weather climates. *Construction and Building Materials*, 20(10), 982-989.

-Brown, E. R., & Manglorkar, H. (1993). *Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures*: National Center for Asphalt Technology Auburn, AL.

-Eghbali, M., Tafti, M. F., Aliha, M., & Motamedi, H. (2019). The effect of ENDB specimen geometry on mode I fracture toughness and fracture energy of HMA and SMA mixtures at low temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 216, 106496.

-Haghshenas, H., Khodaii, A., Hossain, M., & Gedafa, D. (2015). Stripping potential of HMA and SMA: A study using statistical approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), 06015002.

-Jahromi, M. N., & Sarkar, A. (2025). Stone Matrix Asphalt and silica-aerogel composite: mechanical and structural performance. *Results in Engineering*, 106219.

-Jahromi, M. N., Sarkar, A., Mansourian, A., & Zaghi, A. E. (2025). Mechanical Performance of Hot-Mix Asphalt Modified with Porous Nanosilica Aerogels. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(1), 04024436.

-Le, T. H., Nguyen, M. H., Nguyen, H. L., & Nguyen, N.-L. (2022). *Laboratory Study to Determine the Relationship Between Rutting and Dynamic Modulus of Asphalt Concrete*

-معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. (۱۳۸۴). طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) (نشریه شماره ۲۰۶).

-معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. (۱۳۹۰). آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (تجدید نظر اول) (نشریه شماره ۲۳۴).

-Aboutalebi Esfahani, M., & Namavar Jahromi, M. (2020). Optimum parafibre length according to mechanical properties in hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 21(3), 683-700.

-Aliha, M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2016). A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites-Experimental and theoretical study. *International Journal of Solids and Structures*, 90, 167-177.

-Amirdehi, H. F., Aliha, M., Moniri, A., & Torabi, A. (2019). Using the generalized maximum tangential stress criterion to predict mode II fracture of hot mix asphalt in terms of mode I results-A statistical analysis. *Construction and Building Materials*, 213, 483-491.

-Asi, I. M. (2006). Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot

- Rebecchi, J., & Sharp, K. (2009). Guide to pavement technology: part 3: pavement surfacings.
- Sabouri, M., Mirzaiyan, D., & Moniri, A. (2018). Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance. *Construction and Building Materials*, 171, 281-290.
- Selsal, Z., Karakas, A. S., & Sayin, B. (2022). Effect of pavement thickness on stress distribution in asphalt pavements under traffic loads. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01107.
- Tian, Y., Lee, J., Nantung, T., & Haddock, J. E. (2017). Development of a mid-depth profile monitoring system for accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials*, 140, 1-9.
- Wang, Y., & Wang, G. (2011). Improvement of porous pavement. *Final report to US green building council*.
- White, G., & Abouelsaad, A. (2024). *Laboratory Investigation of the Ageing of Dense Graded and Stone Mastic Asphalt Mixtures for Runway Surfacing*. Paper presented at the International Conference on Road and Airfield Pavement Technology 2023.
- Wu, S., Wen, H., Chaney, S., Littleton, K., & Muench, S. (2017). Evaluation of long-term performance of stone matrix asphalt in Washington state. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(1), 04016074.
- Mixture*. Paper presented at the CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures.
- Lim, I., Johnston, I., & Choi, S. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engineering Fracture Mechanics*, 44(3), 363-382.
- Muniandy, R., & Huat, B. B. (2006). Laboratory diametral fatigue performance of stone matrix asphalt with cellulose oil palm fiber. *American Journal of Applied Sciences*, 3(9), 2005-2010.
- Namavar Jahromi, M., Sarkar, A., Mansourian, A., & Esmail Zaghi, A. (2024). Bitumen and silica-aerogel composite; thermal analysis of reaction, structural and mechanical properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(22), 13483-13494.
- Nejad, F. M., Aflaki, E., & Mohammadi, M. (2010). Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1158-1165.
- Nunn, M. (1994). Evaluation of stone mastic asphalt (SMA): A high stability wearing course material. *TRL Project Report*(PR 65).
- Rashed, A. M., & Al-Hadidy, A. (2023). Comparative performance of DG mixes and SMA mixes with waste crumb rubber as aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02615.
- Raya, J. K. (2008). *Standard Specification for Road Work. Kuala Lumpur*. Retrieved from

Comparison of Mechanical and Performance Characteristics of Dense-Graded Asphalt Mixtures and Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures

Mohammad Namavar Jahromi, Ph.D., Graduate, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Alireza Sarkar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Ahmad Mansourian, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Armin Esmail Zaghi, Assistant Professor, Department of Materials Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: sarkar@srbiau.ac.ir

Received: August 2025 - Accepted: October 2025

ABSTRACT

This study aims to compare the mechanical properties of dense-graded and gap-graded asphalt mixtures. In this context, asphalt samples were prepared using 100/85 penetration-grade bitumen, limestone aggregates, and filler. A series of mechanical and performance tests including Marshall stability, Resilience modulus, Moisture sensitivity, Rutting, Fatigue, and Low-temperature fracture—were conducted on both the dense-graded and gap-graded asphalt mixtures. The results indicate that the dense-graded asphalt mixture outperforms the gap-graded asphalt mixture in terms of Marshall stability, resilience modulus, moisture sensitivity, fatigue, and low-temperature fracture. However, at higher temperatures, the gap-graded asphalt mixture demonstrates superior performance compared to the dense-graded mixture. Specifically, the Marshall stability of the dense-graded mixtures is approximately 30% higher than that of the gap-graded samples. Furthermore, the resilience modulus of the dense-graded mixtures exceeds that of the gap-graded mixtures by 27%. Additionally, due to the stone-on-stone contact in the gap-graded asphalt mixture, these mixtures exhibit greater resistance to compressive stresses, resulting in roughly 45% better resistance to rutting compared to the dense-graded mixtures. Finally, the fatigue life of the dense-graded mixtures is more than twice that of the gap-graded asphalt mixtures.

Keywords: Dense Graded, Fracture, Rutting, Stone Mastic Asphalt, Gap Graded