

تأثیر ضریب گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست مخلوط آسفالت گرم

سید رسول صالحی، کارشناسی ارشد راه و ترابری، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد
دماوند

علی دهقان بنادکی*، استادیار، گروه عمران، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

Email: A.Dehghanbanadaki@damavandiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰

چکیده

در این تحقیق، تأثیر ضریب گوشه‌داری با استفاده از آزمایش‌های نسبت استحکام مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم روی حساسیت رطوبتی، شکست نمونه‌ها و قابلیت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد ارزیابی قرار گرفت. از دو نوع سنگ‌شکن کوبیت (طرح ۱) و هیدروکن (طرح ۲) جهت تهیه مصالح سنگی ریزدانه برای تولید آسفالت گرم استفاده شد. هر دو مخلوط آسفالتی با یک فرمول کارگاهی و از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ تهیه شدند. با مقایسه پارامترهای هر دو طرح، نتایج این تحقیق نشان داد که هرچند دانه‌بندی هر دو ماسه تولید شده یکسان است، اما ضریب گوشه‌داری ماسه تولید شده در سنگ‌شکن کوبیت نسبت به ماسه تولید شده در سنگ‌شکن هیدروکن ۷ درصد کاهش داشته است که باعث افزایش ۱/۲ درصدی مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی طرح ۱ نسبت به مخلوط آسفالتی طرح ۲ شده است. علی‌رغم این افزایش در مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی طرح ۱، مقدار قیر مؤثر در این مخلوط آسفالتی یک درصد کاهش یافت. کاهش قیر مؤثر در مخلوط آسفالتی باعث ضعیف شدن اتصال بین قیر و سنگدانه‌ها شد و بر این اساس، دوام رطوبتی و مقاومت در تمام مودهای شکست مخلوط آسفالت طرح ۱، کمتر از مخلوط آسفالت طرح ۲ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، ضریب گوشه‌داری، حساسیت رطوبتی، قابلیت ترک‌خوردگی

۱. مقدمه

سیستم حمل و نقل نقش مهمی در توسعه همه‌جانبه و پایدار کشورها دارد و روسازی راه‌های آسفالتی که در ساخت آن مقدار قابل توجهی قیر و مصالح سنگی استفاده می‌شود، به عنوان یکی از عناصر اساسی سیستم حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود (بهبهانی و همکاران، ۲۰۱۵). مصالح سنگی که حدود ۹۲ تا ۹۶ درصد نسبت وزنی یا ۷۵ تا ۸۵ درصد نسبت حجمی مخلوط‌های آسفالت گرم و بتن آسفالتی را تشکیل می‌دهند، در ساختار آنها نقش بنیادی و تعیین‌کننده دارند. توان بارپذیری، دوام و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در طول مدت بهره‌دهی، به این کمیت غالب و مسلط وابسته است (شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ۱۳۸۷).

جنس و مرغوبیت سنگدانه‌های مورد استفاده در تهیه مخلوط آسفالتی در افزایش مقاومت مخلوط در برابر خرابی‌های مختلف و یا در تسریع این خرابی‌ها مؤثر می‌باشد (فخری و متوسطی خیری، ۱۳۸۸). مرغوبیت مصالح سنگی و نیز مقاومت آن در مقابل ساییدگی و صیقل شدن تا اندازه زیادی بستگی به خواص سنگ معدن مورد استفاده در تهیه مصالح شکسته دارد. از طرف دیگر، روش تهیه مصالح سنگی در مرغوبیت آن مؤثر است. مصالح شکسته شده نه تنها از نقطه نظر استحکام مورد توجه می‌باشند، بلکه شکل دانه‌های مصالح نیز در خواص مکانیکی آسفالت تهیه شده بی‌اندازه اهمیت دارد. مصالحی که شکل نامناسب دارند به هیچ وجه نباید در تهیه آسفالت به‌کار روند زیرا سبب تضعیف خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌شوند. مطالعات انجام شده در این مورد نشان می‌دهد که شکل مصالح شکسته شده تا اندازه زیادی بستگی به جنس سنگ معدن و نیز نوع سنگ‌شکن مورد استفاده در تهیه مصالح شکسته دارد (سرائی پور، ۱۳۷۷). به‌طور کلی، مصالح سنگی به‌کار رفته در آسفالت باید از شکل

و فرم مناسب، دانه‌بندی و بافت سطحی خاصی که در مشخصات فنی آیین‌نامه‌ها ذکر شده‌اند پیروی کنند و عملیات خردایشی که روی سنگ معدن صورت می‌گیرد در جهت تولید مصالح سنگی با مشخصات مذکور می‌باشد (حمیدی جو، ۱۳۹۶).

سنگ‌شکن‌ها، عملیات خرد کردن سنگ‌ها و کاهش ابعاد اولیه آنها تا به‌دست آوردن ابعاد مناسب و مطلوب به منظور استفاده در کارهای عمرانی را انجام می‌دهند. تولید مصالح سنگی مناسب پیش‌نیاز اجرای باکیفیت بسیاری از پروژه‌های عمرانی است. برای تهیه مصالح شکسته، ابتدا سنگ‌های بزرگ موجود در معادن سنگ با استفاده از مواد منفجره و یا پیکور شکسته شده و سپس به وسیله دستگاه‌های سنگ‌شکن به اندازه دلخواه تبدیل می‌شوند (روانشادینیا، ۱۳۹۳). عملیات خردایش از جمله کلیدی‌ترین مراحل فرایند فرآوری مصالح سنگی محسوب می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که این واحد عملیاتی بیش از ۶۰ درصد هزینه سرمایه‌ای، ۴۰ تا ۵۰ درصد هزینه عملیاتی و بیش از ۶۰ درصد انرژی مصرفی کل تجهیزات را در کارخانه‌های فرآوری مصالح سنگی به خود اختصاص می‌دهد (خوشفرمان برجی و همکاران، ۱۳۹۲). بنابراین، در فرآیند طراحی و انتخاب تجهیزات کاهش اندازه و خرد کردن سنگ‌ها، انتخاب نوع سنگ‌شکن از اهمیت زیادی برخوردار است و انتخاب نامناسب آن می‌تواند مشکلات متعددی را طی عملیات به‌وجود آورد، چرا که هر سنگ‌شکن در محدوده‌ای خاص از عوامل، کارکرد بهینه دارد و در بعضی شرایط نیز قابل کاربرد نیست (مرتضوی و بنیسی، ۱۳۹۲). معمولاً سنگ‌شکن‌ها بر حسب محل قرارگیری در سیکل تولید مصالح سنگی به انواع اولیه، ثانویه و حتی ثالثیه طبقه‌بندی می‌شوند. سنگ‌شکن‌های اولیه که از نوع سنگ‌شکن‌های فکی و یا ژیراتوری هستند، سنگ را مستقیماً از حفاری و بعد از انفجار دریافت کرده و اولین کاهش اندازه سنگ را انجام

سازمان برنامه و بودجه تحت عنوان مشخصات فنی و عمومی راه (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۲) و نشریه شماره ۲۳۴ همان مرجع تحت عنوان آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) نیز این حدود پذیرش ارائه گردیده است. بر این اساس، معیارهای پذیرش تیزگوشه بودن مصالح سنگی ریزدانه جهت لایه روسازی‌ای که در معرض عبور ترافیک زیاد قرار می‌گیرد، سختگیرانه‌تر می‌باشد. روش آزمایش تیزگوشه بودن مصالح سنگی ریزدانه بر اساس استاندارد AASHTO T304 (آشتو، ۲۰۱۷)، و یا ASTM C1252 (ریسماتوجو و همکاران، ۲۰۰۳)، با عنوان "مقدار فضای مصالح ریز غیرمتراکم" مشخص می‌شود.

آسیب ناشی از رطوبت در یک ترکیب آسفالت می‌تواند به صورت از دست دادن استحکام، سختی و دوام، به دلیل وجود رطوبت تعریف شود که به از بین رفتن چسبندگی در سطح تماس سنگدانه- قیر و یا به از بین رفتن پیوستگی در قیر یا قیر- فیلر ماستیک، منتهی شود و منجر به مشکلات جدی همانند کاهش مقاومت، از هم پاشیدگی قیر- سنگدانه، چاله و ضعف سازه‌ای روسازی به دلیل تغییر شکل دائمی و ترک خوردگی گردد (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۲). مهمترین مطالعات صورت گرفته در مورد خرابی رطوبتی یا خرابی آبی در مخلوط‌های آسفالتی با فرآیند شناخته شده‌ای با عنوان عریان‌شدگی ارتباط پیدا می‌کند (حامدی، ۱۳۸۹).

به طور کلی، عواملی که باعث عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند به دو دسته عوامل داخلی و عوامل خارجی تقسیم می‌شوند که تأثیر نوع سنگدانه‌ها از عوامل داخلی مؤثر بر عریان‌شدگی محسوب می‌گردد (کاووسی و نظیری زاد، ۱۳۹۲). خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی

می‌دهند. خروجی سنگ‌شکن‌های اولیه تغذیه سنگ‌شکن ثانویه شده که در این مرحله خردایش بیشتر صورت می‌گیرد. سنگ‌شکن‌های ثانویه و ثالثیه شامل سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای (کوبیت)، و انواع سنگ‌شکن‌های مخروطی و غلتکی نظیر ماسه‌سازها بوده که محصول سنگ‌شکن اولیه را به محصول نهایی، یعنی ماسه ۰-۶ میلی‌متر و شن ۶-۲۵ میلی‌متر تبدیل می‌کنند (روانشادینیا، ۱۳۹۳).

بر اساس نشریه انستیتو آسفالت آمریکا (۲۰۱۵)، خصوصیات ویژه تعیین شده برای مصالح سنگی در عملکرد خوب مخلوط آسفالت گرم بسیار مهم هستند و به طور وسیعی توسط دامنه گسترده‌ای از متخصصین تأیید شده‌اند. از جمله این خصوصیات، گوشه‌دار بودن مصالح سنگی ریزدانه می‌باشد (انستیتو آسفالت، ۲۰۱۵). گوشه‌دار بودن مصالح سنگی ریزدانه، درجه‌ای از اصطکاک داخلی مصالح ریز و مقاومت در برابر شیارشدگی را مطمئن می‌سازد و به صورت درصد فضای خالی موجود در مصالح سنگی به صورت نرم کوبیده ریزتر از الک ۲/۳۶ میلی‌متر تعریف می‌شود (انستیتو آسفالت، ۲۰۱۵). صعوبت آزمایش سطوح شکسته مصالح سنگی ریزدانه و اطلاع از این موضوع که بافت سنگدانه‌های ریز بیشتر از درشت دانه‌ها بر خواص حجمی یک مخلوط آسفالتی تأثیر می‌گذارد، منجر به توسعه آزمایش تعیین فضای خالی در حالت غیرمتراکم گردیده است. در بسیاری از برنامه‌های کنترل کیفی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تیزگوشه بودن مصالح سنگی الزامی گشته است که این امر به لحاظ تأثیر بافت سطحی سنگدانه‌ها بر خواص حجمی یک مخلوط آسفالتی مدنظر قرار گرفته است (انستیتو آسفالت، ۲۰۰۷).

معیارهای پذیرش برای این مشخصات بر اساس مقدار بار ترافیک عبوری و موقعیت در سازه روسازی هستند (انستیتو آسفالت، ۲۰۱۵). در نشریه شماره ۱۰۱

شاه و عبدالله (۲۰۱۰)، در تحقیقی نشان دادند که شکل سنگدانه‌ها بر روی مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط خشک و مرطوب مؤثر می‌باشد. در این تحقیق سه شکل مختلف از مصالح سنگی شامل مصالح سنگی گوشه‌دار، سوزنی و پولکی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که سنگدانه‌های گوشه‌دار بیشترین مقاومت لغزندگی و سنگدانه‌های پولکی کمترین مقاومت لغزندگی را دارا می‌باشند. همچنین، تحت شرایط مرطوب سطح روسازی، مقاومت لغزندگی کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، بوراک و عنصری (۲۰۱۴)، اثر شکل سنگدانه‌ها را بر خصوصیات سطحی روسازی انعطاف‌پذیر بررسی نمودند. در این پژوهش، از دو نوع سنگدانه بازالتی و آهکی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که نمونه سنگدانه‌های بازالتی که با ضربه خرد شده‌اند، بیشترین ضریب اصطکاک را دارند.

ایم و همکاران (۲۰۱۴)، تلاش‌هایی تجربی و عددی را برای توصیف ویژگی‌های شکست مود I و مود II مربوط به ساختار مصالح ریزدانه مخلوط آسفالتی انجام داده‌اند. برای این منظور، تست‌های نیم‌دیسک خمشی که در نرخ بارگذاری ۱۰ میلی‌متر در دقیقه و در دمای تست متوسط ۲۱ درجه سلسیوس انجام شده، با یک سیستم همبستگی تصویری دیجیتال و روش المان محدود توسعه‌یافته تلفیق شدند. با توجه به دامنه محدود و نتایج آزمون، این رویکرد نشان داد که چقرمگی شکست مود II با چقرمگی شکست مود I متفاوت است (تقریباً سه برابر بیشتر از مود I). نتایج به وضوح نشان می‌دهد که ویژگی‌های شکست مرتبط با مود، که معمولاً شکست چندمحوره با آنها همراه است، در طراحی ساختاری روسازی آسفالتی ضروری است. اگرچه نتایج آنالیز تست محدود بوده و محدودیت‌های فنی زیادی در این مرحله وجود داشته است، اما این تحقیق بینش قابل توجهی در مورد طراحی روسازی و مواد آسفالتی

بر عریان‌شدگی تأثیر می‌گذارد. افزایش گوشه‌دار بودن سنگدانه‌ها و زبری سطح سنگدانه‌ها باعث افزایش درجه نیروی قفل‌وبست مکانیکی بین سنگدانه‌ها می‌شود که می‌تواند مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را بهبود ببخشد. اما پوشش کامل و یکنواخت قیر روی سنگدانه‌های دارای گوشه‌داری زیاد به سختی حاصل می‌شود. پوشش قیر در گوشه‌های سنگدانه‌ها بسیار نازک بوده و نسبت به شکستن مستعد هستند. افزایش گوشه‌دار بودن و زبری سطح همچنین سبب افزایش سطح ویژه و سطح تماس بین سنگدانه و قیر می‌شود. این موضوع ممکن است که سبب افزایش نیروی گیرداری و نیز افزایش میزان قیر مورد نیاز شود (کاووسی و نظیری زاد، ۱۳۹۲).

واقفی و سرکار (۱۳۹۸)، در تحقیقی، به بررسی تأثیر خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها بر پیرشدگی بلندمدت قیر پرداختند. در این تحقیق، نتایج آزمایش‌ها بیانگر این بود که اندازه اسمی سنگدانه‌ها تأثیر به‌سزایی بر میزان قیر بهینه و فیلم نازک قیر در مخلوط‌های آسفالتی داشته است، به نحوی که با افزایش اندازه سنگدانه‌ها (درشت شدن مصالح سنگی) میزان قیر بهینه کاهش یافته و فیلم نازک قیر ضخیم‌تر شده و با کاهش اندازه سنگدانه‌ها، قیر بهینه افزایش یافته و فیلم نازک قیر نازک‌تر می‌گردد. سنگ‌سفیدی و همکاران (۱۳۹۴)، در تحقیقی با عنوان تأثیر دانه‌بندی مصالح بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی، با استفاده از سه دانه‌بندی مختلف شامل یک دانه‌بندی در حد پایین، یک دانه‌بندی در حد بالا و یک دانه‌بندی در حد وسط دانه‌بندی ذکر شده در ستون چهارم جدول ۹-۱ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، نشان دادند که مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی در حد پایین آیین‌نامه، از نظر پارامترهای عملکردی رفتار مناسب‌تری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با دانه‌بندی‌های دیگر داشته است.

سنگ‌شکن یکی از پروژه‌های آزادراهی کشورمان، از یک نوع سنگ معدن و با استفاده از دو نوع سنگ‌شکن کوبیت و هیدروکن، مصالح سنگی ریزدانه تهیه شد. اثر گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه بر پارامترهای مختلف طرح اختلاط آسفالت گرم به روش مارشال و حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی سنگ‌شکن‌ها و نقش آنها در تأثیر گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه در عملیات اجرایی به عنوان نوآوری تحقیق معرفی می‌شود.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱. مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱. مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از نوع مصالح کوهی آهکی دولومیتی و متعلق به منطقه آبیگ قزوین بوده که در کارگاه سنگ‌شکن توسط دو سنگ‌شکن کوبیت و هیدروکن تولید گردید. آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی (آزمایش سایش، تعیین ارزش ماسه‌ای، درصد شکستگی، تطویل و تورق، ضریب گوشه‌داری و افت وزنی در مقابل سولفات سدیم) روی نمونه‌ها انجام شده که نتایج مرغوبیت مصالح سنگی در جدول ۱ نشان داده شده است.

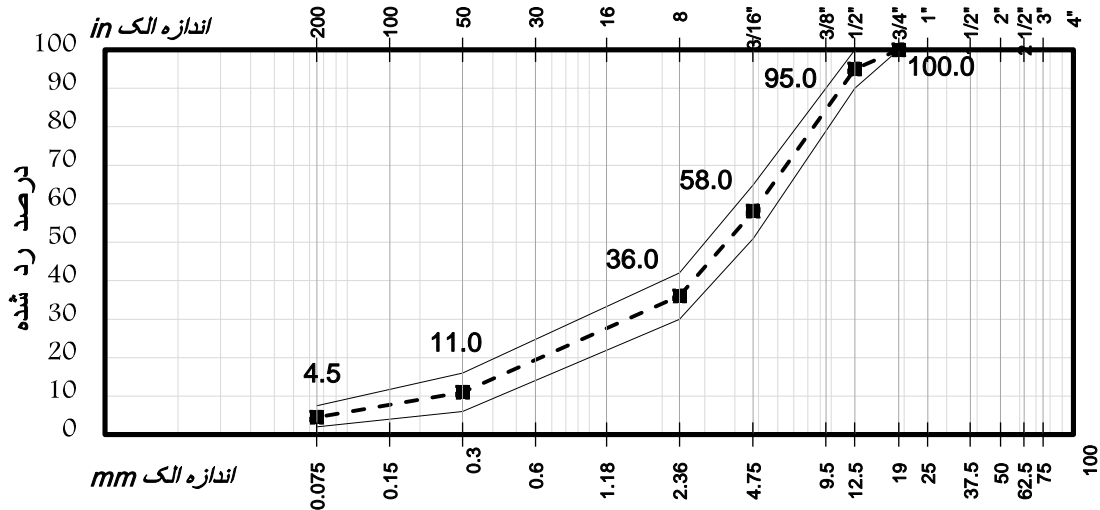
با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی و با استفاده از ستون چهارم جدول ۱-۹ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، بر اساس استاندارد ASTM D3515، منحنی دانه‌بندی فرمول کارگاه مورد استفاده یا دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در تهیه مخلوط‌های آسفالتی به شرح شکل ۱ می‌باشد

ارائه می‌دهد. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که ویژگی‌های شکست وابسته به مود مواد آسفالت در طراحی روسازی سازه‌ای، که معمولاً با آن آسیب‌های چندمحوره همراه است، مورد نیاز است.

نتایج یک پژوهش در مورد مخلوط‌های آسفالتی مختلف با دانه‌بندی باز و متراکم نشان داد که هنگام شکست، مخلوط آسفالت با دانه‌بندی متراکم دارای بیشترین تعداد ترک‌های ریز نسبت به مخلوط آسفالت با دانه‌بندی باز می‌باشد و ترک‌های مود I که عمدتاً ناشی از کشش هستند نسبت به ترک‌های مود II غالب هستند. همچنین، مشخص شد که مخلوط آسفالت با دانه‌بندی متراکم به انرژی شکست بیشتری نیاز دارد (دو و همکاران، ۲۰۲۱a). در پژوهشی دیگر توسط دو و همکاران (b ۲۰۲۱)، تأثیر دمای کم بر مقاومت ترک‌خوردگی نشان داد که افزایش مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالت در دمای کم بستگی به اندازه ذرات سنگدانه دارد.

به‌طور کلی، سنگ‌شکن‌های کوبیت و هیدروکن هر دو از زیرمجموعه‌های سنگ‌شکن محسوب می‌شوند؛ ولی تفاوت‌های زیادی با هم دارند. در سنگ‌شکن کوبیت، سنگ به صورت ضربه مستقیم که پس از برخورد با روتور و سندان‌ها دارد خردایش شده و به صورت تیز و شکسته خرد می‌شود. اما در سنگ‌شکن هیدروکن، سنگ پس از ورود، با ساییده شدن قطعات به هم، خرد می‌شود که محصول خروجی به صورت پولکی می‌باشد. مکانیزم عملکرد کوبیت ضربه‌ای و مکانیزم عملکرد هیدروکن سایشی می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی تأثیر گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست مخلوط آسفالتی می‌باشد. برای این مهم، در کارگاه

تأثیر ضریب گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست مخلوط آسفالت گرم



شکل ۱. منحنی مخلوط مصالح سنگی

جدول ۱. نتایج مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج آزمایش			مشخصه	
فیلر مصالح	ماسه ۰-۶ میلی‌متر	مخلوط درشت‌دانه		
-	۶۸ و ۷۳		ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)	
-	-	B	نوع دانه‌بندی	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس (AASHTO-T96)
-	-	۵۰۰	تعداد دور	
-	-	۲۳	درصد سایش	
N.P	N.P	-	دامنه خمیری (PI)	حدود اتربرگ (AASHTO-T89,90)
-	-	-	حد خمیری (PL)	
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-	حد روانی (LL)	
-	-	۱۰۰	در یک جبهه	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (ASTM-D5821)
-	-	۱۰۰	در دو جبهه	
-	۳۹ و ۴۷	بیش از ۹۵	گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه (درصد) (ASTM-C1252) درصد اندود قیر به مصالح سنگی (AASHTO-T182)	
-	-	۲	تطویل	درصد تطویل و تورق (BS-812)
-	-	۳	تورق	
-	۰/۶		ریزدانه	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)
-	-	۰/۳	درشت‌دانه	

۲-۱-۲. قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ بود. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر مصرفی با مشخصات طبق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های کنترل کیفی قیر

مشخصات استاندارد		نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیرهای خالص
حداکثر	حداقل		AASHTO	ASTM	
-	-	۱/۰۱۴	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ °C
۷۰	۶۰	۶۷	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ °C (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلی-متر
۵۶	۴۹	۵۱	T53	D36	نقطه نرمی (ساچمه- حلقه) بر حسب درجه سلسیوس
-	۱۰۰	بیش از ۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ °C بر حسب سانتی‌متر
-	۹۹	۹۹/۸	T44	D2042	حلالیت در تری کلرواتیلن بر حسب درصد
-	۲۳۲	۳۰۳	T48	D92	درجه اشتعال (روپاز-کلولند) بر حسب درجه سلسیوس
-	-	۶۲۰	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ °C (سانتی استوکس)
-	-	۳۱۵	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ °C (سانتی استوکس)
-	-	۱۱۲	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۶۰ °C (سانتی استوکس)
۰/۸	-	۰/۰۲	T179	D1754	لعاب نازک قیر (۱۶۳ °C - پنج ساعت) افت حرارتی، درصد
-	-	۵۰	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلی‌متر
-	۵۴	۷۵	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه
-	۵۰	بیش از ۵۰	-	-	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش ۲۵ °C بر حسب سانتی‌متر

۲-۲. طرح اختلاط

استفاده شد. سپس، برای هر مخلوط آسفالتی سه نمونه برای هر درصد قیر تهیه می‌گردد و هر سری نمونه با افزایش ۰/۵ درصد قیر به گونه‌ای تهیه می‌شود که حداقل دو سری نمونه مخلوط آسفالتی با درصد قیر بیشتر و دو سری نمونه مخلوط آسفالتی با درصد قیر کمتر نسبت به قیر بهینه ساخته شده باشد. قیر مورد استفاده به گونه‌ای گرم می‌شود که در حین اختلاط، دمای آن برابر با دمایی باشد که در آن دما کندروانی کینماتیک قیر معادل 2 ± 170 سانتی‌استوکس گردد. پس از عمل اختلاط، نمونه مخلوط آسفالتی به داخل

در این تحقیق از طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1559 (۱۹۹۳) برای هر دو مخلوط آسفالتی استفاده شد. برای این منظور، سنگدانه‌های درشت (۱۹-۶ میلی‌متر) بین هر دو طرح مشترک بوده واز ماسه و فیلر (۶-۰ میلی‌متر) تولید شده توسط سنگ‌شکن کوپیت جهت تهیه مخلوط آسفالت گرم طرح ۱ و از ماسه و فیلر (۶-۰ میلی‌متر) تولید شده توسط سنگ‌شکن هیدروکن جهت تهیه مخلوط آسفالت گرم طرح ۲

وجود دارد که هر سه روش به یک نتیجه منتهی می‌گردند. در این تحقیق، از روش A استانداردهای مذکور استفاده شده است. شکل ۲، دو نوع ماسه مورد استفاده در این تحقیق و همچنین دستگاه و مرحله انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.

یک نمونه ۱۹۰ گرمی از سنگدانه‌های ریز هر کدام از دانه‌بندی‌ها (تهیه شده با ماسه کوبیت و ماسه هیدروکن) تعیین شده، اجازه داده می‌شود تا از طریق دهانه قیف جریان یابد و یک سیلندر واسنجی شده ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب را پر کند. مواد اضافه از بین می‌رود و سیلندر با سنگدانه وزن می‌شود. درصد فضای خالی نمونه فشرده نشده با استفاده از وزن سنگدانه‌های کاملاً فشرده نشده و شل، وزن مخصوص خشک سنگدانه‌ها و حجم واسنجی شده سیلندر گیرنده مصالح بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$U = \frac{V - (F/G)}{V} \times 100$$

(۱)

که در آن U فضای خالی متراکم نشده، V حجم استوانه، F وزن نمونه و G چگالی مصالح می‌باشد (آشتو، ۲۰۱۷؛ ریسمانتوجو و همکاران، ۲۰۰۳).

قالب مخصوص مارشال ریخته شده و در دمای تراکم که معادل دمایی است که در آن دما کندروانی قیر برابر 280 ± 30 سانتی‌استوکس می‌باشد، متراکم می‌گردد. عمل تراکم در روش مارشال به وسیله چکش مارشال که وزن آن حدود ۴/۵ کیلوگرم بوده و از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر به‌طور آزاد سقوط می‌کند، به‌صورت ضربه‌ای انجام می‌گردد. تعداد ضربات چکش با توجه به نوع راهی که آسفالت می‌شود و ترافیک عبوری از آن تعیین می‌گردد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲). در این تحقیق، ۷۵ ضربه چکش به هر طرف نمونه‌های مارشال برای هر دو نوع مخلوط مصالح سنگی مورد استفاده وارد شده است.

۲-۳. تعیین ضریب گوشه‌داری مصالح سنگی

ریزدانه

ضریب گوشه‌داری بر اساس استانداردهای AASHTO-T304 و ASTM C1252 با تعیین مقدار فضای خالی نکوبیده مصالح ریزدانه جهت مصالح ریزدانه مشخص می‌شود. در استانداردهای AASHTO-T304 و ASTM C1252، سه روش جهت محاسبه ضریب گوشه‌داری



شکل ۲. ماسه‌های شکسته کوبیت و هیدروکن

های آسفالتی نامتراکم به مدت 1 ± 16 ساعت درون آون در دمای 60°C قرار داده می‌شوند. قبل از متراکم کردن، نمونه‌های آسفالتی به مدت ۲ ساعت درون آون در دمای تراکم قرار داده می‌شوند. پس از آن، نمونه‌ها با سه ضربه متفاوت ۱۰، ۳۰ و ۶۰ متراکم شدند و با رسم فضای خالی به‌دست آمده از ضربات پس از به‌دست آوردن فضای خالی ۷ درصد ضربه مورد نیاز تعیین شد (در این پژوهش ۵۲ ضربه). سپس، نمونه‌های جدید با ضربه مشخص شده با درصد حفرات هوای 1 ± 7 متراکم شدند. نمونه‌ها به دو گروه نمونه‌های خشک و نمونه‌های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته تقسیم شدند. سپس، نمونه‌های تعیین شده برای شرایط مرطوب را تحت خلأ قرار داده تا به درجه اشباع ۸۰-۵۵ درصد برسند. نمونه‌های اشباع شده به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای -18 درجه سلسیوس و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای 60 درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند. بقیه نمونه‌ها در شرایط خشک نگهداری می‌شوند. همه نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 25 درجه سلسیوس قرار داده شده و سپس آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌ها انجام می‌شود. مقدار کشش غیرمستقیم از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$S = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (3)$$

که در آن، P حداکثر مقدار بار عمودی وارده، D قطر نمونه و t ضخامت نمونه می‌باشد. نسبت مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$TSR = \frac{S_{cond}}{S_{uncond}} \times 100 \quad (4)$$

که در آن، S_{cond} میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته و S_{uncond}

۲-۴. نسبت متوسط مقاومت نمونه‌های اشباع و خشک مارشال MSR

با استفاده از روش مارشال و استاندارد ASTM D1559، نمونه‌های متراکم مارشال برای مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده و سپس بر اساس آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، نسبت متوسط مقاومت سه نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب 1 ± 60 درجه سلسیوس قرار گرفته باشند (MS_{cond}) به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در داخل آب 1 ± 60 درجه سلسیوس نگهداری شوند (MS_{uncond})، به عنوان یکی از پارامترهای دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب بر اساس رابطه (۲) تعیین می‌گردد. بر اساس آیین‌نامه مذکور، این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰).

$$MSR = \frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \times 100 \quad (2)$$

۲-۵. آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد AASHTO T283 (۲۰۰۷) جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم استفاده می‌شود. این آزمایش متداول‌ترین آزمایشی است که برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی و نیز تأثیر مواد ضد عریان‌شدگی به‌کار می‌رود. مواد کافی برای تولید حداقل ۶ نمونه مخلوط آسفالت گرم در درصد قیر بهینه مشخص شده با استفاده از روش مارشال و استاندارد ASTM D1559 با هم مخلوط می‌شوند. سپس، مخلوط آسفالتی تهیه شده درون ظرف‌هایی ریخته شده و به مدت 0.5 ± 2 ساعت در دمای محیط خنک می‌شوند. جهت عمل‌آوری، نمونه-

ترک‌خوردگی مواد مختلف استفاده نمود (کاووسی و متولی زاده، ۱۳۹۸).

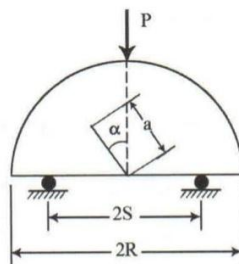
چقرمگی شکست یک خاصیت مکانیکی است که میزان مقاومت در مقابل شکست ناگهانی یا سریع مواد را در حضور ترک بیان می‌کند. بنابراین، روسازی‌های آسفالتی باید دارای سطحی از چقرمگی شکست باشند که در مقابل تنش‌های وارده در دماهای مختلف که روسازی‌های آسفالتی در معرض آن قرار می‌گیرند، مقاوم باشند. در منابع موجود در مورد مطالعات تجربی شکست و رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که قطعات آزمایشگاهی متنوعی جهت بررسی شکست آسفالت توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (دانشگاه علم و صنعت و پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۹۱). در میان این قطعات، قطعه نیم‌دایره شکل (SCB) تحت بار خمش سه‌نقطه‌ای نمونه مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست بتن آسفالتی است. چرا که این نمونه را می‌توان به راحتی با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری و با مغزه‌گیری از سطح جاده فراهم کرد. همچنین، ایجاد ترک لبه‌ای در این قطعه و بارگذاری آن نیز به آسانی انجام می‌شود. قطعه SCB یک نیم‌دایره به شعاع R و ضخامت t است که در آن یک ترک لبه‌ای به طول a وجود داشته و با اعمال بار P به صورت خمش سه-نقطه‌ای تحت بار قرار می‌گیرد. علاوه بر سادگی هندسی قطعه و بارگذاری آن، این قطعه توانایی ایجاد حالت‌های مختلف مود ترکیبی کششی-برشی را نیز دارد (محمدعلیها و همکاران، ۱۳۹۴). این قطعه در شکل ۳ نشان داده شده است.

میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک می‌باشد (آشتو، ۲۰۰۷). بر اساس آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰).

۶-۲. آزمایش شکست

ضریب شدت تنش و انرژی شکست را می‌توان به عنوان ابزارهای ارزیابی مشخصات قابلیت ترک‌خوردگی مواد مختلف معرفی نمود. ضریب شدت تنش که بر پایه تئوری قابلیت ترک‌خوردگی الاستیک خطی تعریف می‌شود و در شرایط خاصی که بتوان رفتار آسفالت را الاستیک فرض نمود، قابل استفاده می‌باشد. از سوی دیگر، انرژی شکست پارامتری غیروابسته به این تئوری بوده و برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمایی و بارگذاری مختلف (صرفنظر از رفتار الاستیک و پلاستیک مخلوط‌های آسفالتی) قابل استفاده است (کاووسی و متولی زاده، ۱۳۹۸).

ضریب شدت تنش به عنوان یکی از پارامترهای تحلیل رفتار قابلیت ترک‌خوردگی مواد، تابع تنش وارده به نمونه و مشخصات هندسی آن می‌باشد. از طرفی، این ضریب بر پایه تئوری قابلیت ترک‌خوردگی مصالح الاستیک خطی استوار است. مقدار بحرانی این ضریب در مود بارگذاری که تحت عنوان K_{IC} معرفی می‌گردد، ضریب شدت تنش در زمان شکل‌گیری ترک را نشان می‌دهد که به عنوان چقرمگی شناخته می‌شود. بر اساس رویکرد قابلیت ترک‌خوردگی مصالح الاستیک خطی، می‌توان از این مقدار برای ارزیابی مقاومت



شکل ۳. قطعه نیم‌دیسک تحت خمش سه نقطه‌ای

که در آنها a طول ترک، Y_I و Y_{II} ضرایب شکل مود I و II، نیروی وارده به قطعه در هر مود، R شعاع دیسک و t ضخامت نیم‌دیسک می‌باشد (دانشگاه علم و صنعت و پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۹۱).

پژوهشگران، روش المان محدود را به عنوان روشی قابل اعتماد به منظور تعیین شاخص Y_I برای هندسه‌های مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی پیشنهاد نموده‌اند (کاووسی و متولی زاده، ۱۳۹۸).

در این تحقیق، ابتدا نمونه‌های هر دو مخلوط آسفالتی تهیه شده با ماسه هیدروکن و ماسه کوبیت، در قالب‌های با قطر ۱۵ سانتی‌متر و با میزان درصد فضای خالی $1 \pm 7\%$ درصد، توسط دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری متراکم شدند. سپس، نمونه‌ها با توجه به اهداف تحقیق و با توجه به استاندارد AASHTO TP-105 به ضخامت $2/5$ سانتی‌متر برش داده شدند و سپس در مرکز قاعده نمونه‌های SCB به دست آمده از برش، شیاری به طول ۱۵ میلی‌متر ایجاد شد.

این نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای -18 درجه سلسیوس قرار داده شدند و پس از آن نمونه‌ها در روی تکیه‌گاه دستگاه آزمایش شکست مستقر گردیدند که شماتیک آن جهت آزمایش شکست در مود I در شکل ۴ و جهت مود II در شکل ۵ نشان داده شده است.

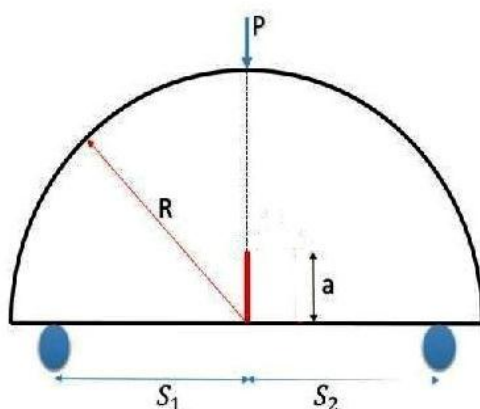
از این قطعه در موارد متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مود I استفاده شده است و نتایج به دست آمده از آن با نتایج سایر تکنیک‌ها قابل مقایسه می‌باشد. در ابتدا، از این قطعه برای تعیین چقرمگی شکست مود I استفاده می‌گردید. ولی اخیراً برای مطالعه چقرمگی شکست مود ترکیبی I و II نیز استفاده می‌شود. بسته به اینکه شکاف با چه زاویه‌ای نسبت به محور اصلی استوانه قرار گیرد (α) و یا فاصله تکیه‌گاه چگونه تغییر کند، حالت‌های مختلفی از ترکیب مود I و II ایجاد می‌شود. برای ایجاد مود خالص کششی، یعنی مود I، کافی است که ترک هم‌امداد با راستای نیروی P باشد، یا به عبارت دیگر، زاویه α برابر صفر شود. با زوایای α متفاوت، مودهای ترکیبی و در یک زاویه α خاص، مود خالص برشی به دست می‌آید. ضریب شدت تنش این قطعه برای مودهای I و II و مود مختلط I و II، با استفاده از معادلات (۵) تا (۸) به دست می‌آید:

$$K_I = Y_I \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

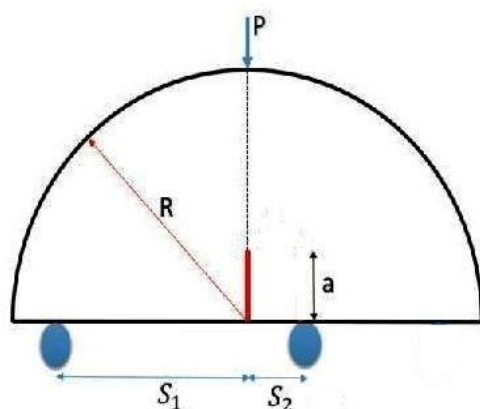
$$K_{II} = Y_{II} \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

$$K_{II,I} = Y_{II,I} \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_i}{2Rt} \quad (8)$$



شکل ۴. شماتیک نمونه SCB روی تکیه گاه دستگاه در مود I



شکل ۵. شماتیک نمونه SCB روی تکیه گاه دستگاه در مود II

۱-۱-۳-۱. تعیین وزن مخصوص، فضای خالی، جذب آب و جذب قیر منظور از ساختار منفذی سنگدانه‌ها، ویژگی آنها و نحوه آرایش حفرات و فضاهای خالی موجود در آنها می‌باشد. حفرات خالی موجود در سنگدانه‌ها ممکن است کاملاً جدا از هم و غیرمرتبط به یکدیگر بوده و یا در سنگدانه‌ها محبوس باشند که در این صورت سنگدانه‌ها نفوذناپذیر می‌گردند. افزایش فضای خالی سنگدانه‌ها موجب کاهش میزان مقاومت و وزن مخصوص آنها می‌گردد. جذب نیز به قابلیت نفوذ هر گونه مایع به داخل فضای خالی موجود در سنگدانه‌ها اطلاق می‌شود. وزن مخصوص ظاهری و حقیقی بخش-های مختلف سنگدانه‌ها و وزن مخصوص حقیقی

فاصله تکیه‌گاه‌ها در مود خالص کششی یا مود I برابر ۱۲ سانتی‌متر ($S_2 = S_1 = 6$) و طول ترک اولیه a برابر ۱۵ میلی‌متر و در آزمایش مود برش خالص یا مود II، فاصله تکیه‌گاه‌ها برابر $6/8$ سانتی‌متر ($S_2 = 0/8$) و $S_1 = 6$ و طول ترک اولیه برابر $22/5$ میلی‌متر می‌باشد. آزمایش شکست در مود یک، با استفاده از نمونه‌های آزمایش SCB و با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت. با استفاده از روش اجزای محدود، مقادیر Y_I برابر $4/71$ ، Y_{II} برابر $1/878$ و Y_{III} برابر $1/113$ محاسبه شده است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج طرح اختلاط مارشال

آسفالتی تهیه شده با ماسه هیدروکن در جدول ۴ ارائه شده است. درصد جذب قیر با استفاده از آزمایش رایس، برای هر دو مخلوط آسفالتی محاسبه شده است.

مخلوط مصالح سنگی G_{sb} و مقدار جذب آب و همچنین درصد جذب قیر برای طرح شماره ۱ مربوط به مخلوط آسفالتی ساخته شده با ماسه تولیدی کوبیت در جدول ۳ و برای طرح شماره ۲ مربوط به مخلوط

جدول ۳. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی در طرح ۱

درصد جذب آب	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۰/۷	۲/۶۸۲	۲/۷۳۰	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۲	۲/۶۵۷	۲/۷۴۴	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-		۲/۷۱۲	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ (فیلر مصالح سنگی)
	۲/۶۷۵		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی G_{sb}
	۰/۴۷		درصد جذب قیر

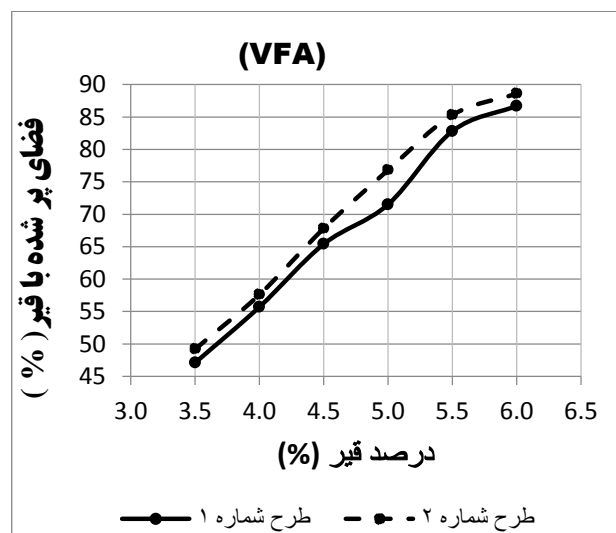
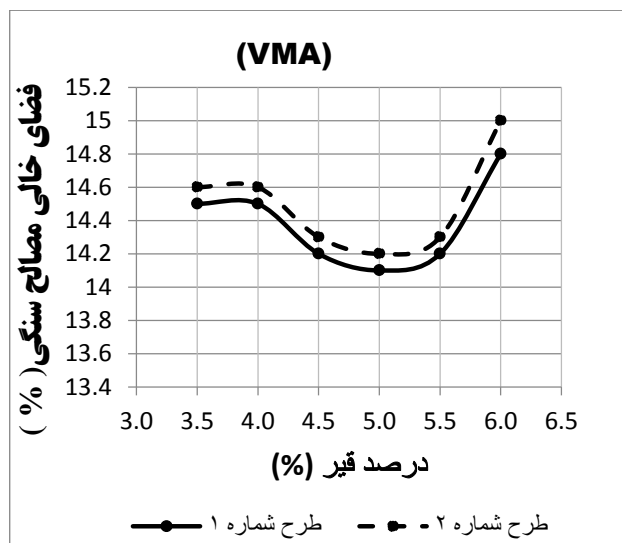
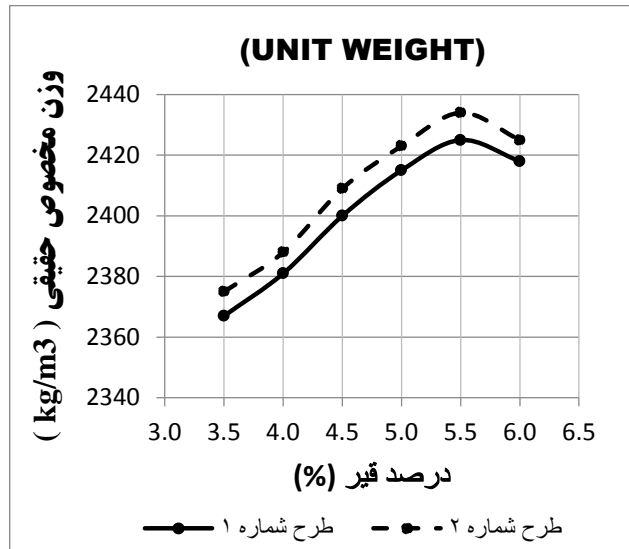
جدول ۴. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی در طرح ۲

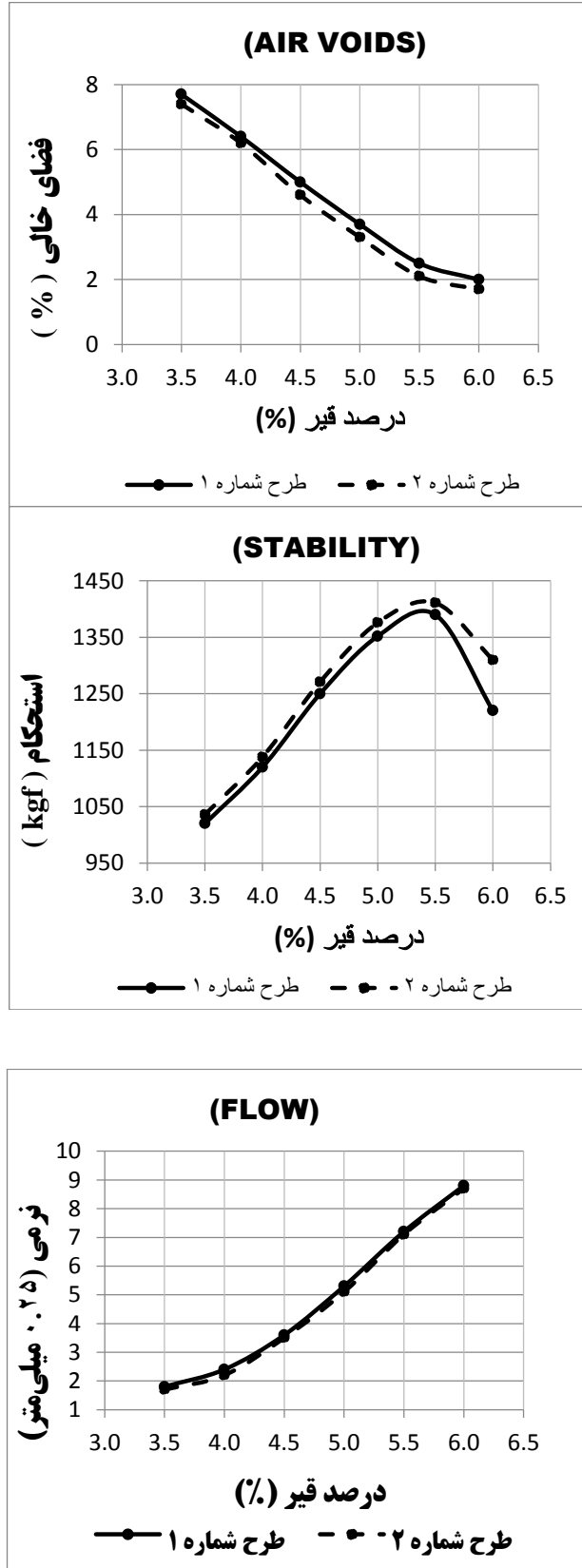
درصد جذب آب	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۰/۶	۲/۶۹۵	۲/۷۳۹	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱	۲/۶۶۰	۲/۷۵۵	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-		۲/۷۱۲	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ (فیلر مصالح سنگی)
	۲/۶۸۵		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی G_{sb}
	۰/۳۵		درصد جذب قیر

کوبیت (طرح ۱) و مخلوط آسفالتی تهیه شده با ماسه هیدروکن (طرح ۲) نشان می‌دهد.

۳-۱-۲. نمودارهای مارشال

شکل ۶، نمودارهای پارامترهای مختلف طرح اختلاط مارشال را در هر دو مخلوط آسفالتی تهیه شده با ماسه





شکل ۶. نمودار پارامترهای مختلف مارشال مربوط به مخلوط‌های آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲

آسفالت، ۲۰۱۵). درصد وزنی قیر مؤثر برای هر دو مخلوط آسفالتی با استفاده از مفاد مندرج در آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰)، محاسبه شده است.

جدول ۵، درصد وزنی قیر بهینه و درصد وزنی قیر مؤثر محاسبه شده برای هر دو مخلوط آسفالتی را نشان می دهد. درصد وزنی قیر بهینه با توجه به پیشنهاد نشریه انستیتو آسفالت (۲۰۱۵) را نشان می دهد. بر اساس این نشریه، مقدار قیر متناظر با درصد فضای خالی ۴ درصد مخلوط متراکم آسفالتی برابر قیر بهینه می باشد (انستیتو

جدول ۵. درصد قیر بهینه مخلوط های آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲

مخلوط آسفالتی طرح ۲	مخلوط آسفالتی طرح ۱	
۴/۷	۴/۸	درصد قیر بهینه
۴/۳۷	۴/۳۵	درصد قیر مؤثر

نتایج مربوط به محاسبه ضریب گوشه داری سنگدانه های مربوط به مخلوط آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲ در جدول ۶ ارائه شده است.

۳-۲. تعیین ضریب گوشه داری مصالح سنگی

جدول ۶. ضریب گوشه داری سنگدانه های طرح ۱ و طرح ۲

الک های انتخابی از ۲/۳۶ الی ۰/۰۳ میلی متر	الک های انتخابی از ۲/۳۶ الی ۰/۰۳ میلی متر
درصد حجم فضای خالی ماسه هیدروکن (طرح ۲)	درصد حجم فضای خالی ماسه کوبیت (طرح ۱)
۴۶	۳۹

دارای تعداد ذرات کمتری در یک وزن واحد بوده و در نتیجه دارای ضریب گوشه داری بیشتر و مساحت سطح کمتری می باشد. افزایش میزان مساحت مصالح سنگی سبب کاهش مقدار قیر مؤثر می گردد و در نتیجه پوشش قیر دور سنگدانه ها کاهش می یابد. در نتیجه، در تولید مخلوط آسفالتی، قیر مؤثر در مخلوط آسفالتی تهیه شده با ماسه هیدروکن (طرح ۱) بیشتر بوده که سبب پیوند بهتر بین قیر و سنگدانه ها می گردد.

همچنین، مخلوط آسفالت دارای ماسه هیدروکن (طرح ۲) با توجه به حدود مجاز ضریب گوشه داری مندرج در آیین نامه روسازی راه های ایران و نشریه انستیتو آسفالت (۲۰۱۵)، شرایط فنی بهتری را از لحاظ گوشه داری مصالح سنگی ریزدانه دارا می باشد.

گوشه دار بودن مصالح سنگی ریزدانه، بر اصطکاک داخلی ریزدانه ها تأثیر بسیار دارد. این خاصیت از شکل دانه ها، بافت سطحی و دانه بندی متأثر است و مقدار زیاد ضریب گوشه داری به معنای مقدار فضای مصالح ریزدانه بیشتر و معمولاً به معنای جبهه های شکسته بیشتر سنگدانه های ریز است (انستیتو آسفالت، ۲۰۱۵).

ماسه تولید شده در سنگ شکن کوبیت به علت شکست نامناسب دارای دانه های پولکی شکل زیادی می باشد و در نتیجه دارای وجوه شکست کمتر و تعداد ذره بیشتری در یک وزن واحد از آن بوده و در نتیجه دارای ضریب گوشه داری کمتر و مساحت سطح بیشتری می باشد. از طرف دیگر، ماسه تولید شده در سنگ شکن هیدروکن به علت وجوه شکسته شده بیشتر

کمتر، دارای VFA بیشتری بوده که کاهش قیر مؤثر را به دنبال داشته و این مهم باعث کاهش وزن مخصوص نمونه مارشال شده است. دلیل افزایش درصد قیر بهینه (متناظر با ۴ درصد فضای خالی) نیز همین موضوع بوده که باعث نرمی بیشتر این مخلوط آسفالتی نیز شده است.

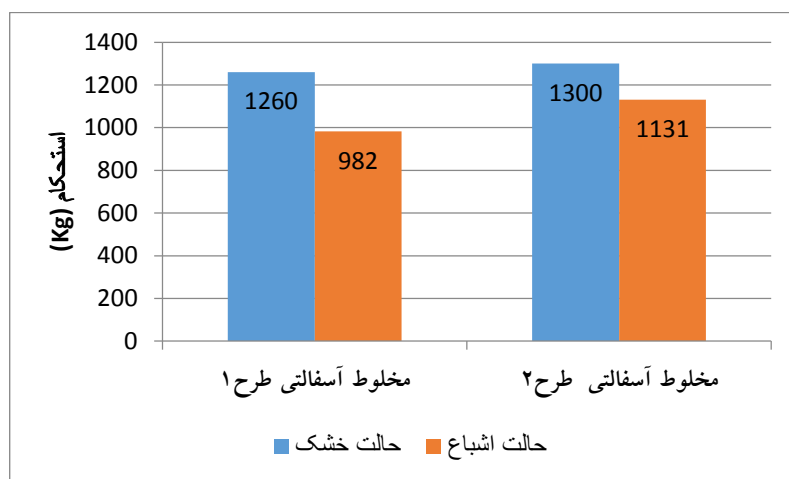
لازم به ذکر است که منظور از ریزتر شدن ماسه کوبیت، خردایش و شکست ریزتر سنگدانه در حد فاصل الک‌های مبنا می‌باشد. به عنوان مثال، در فاصله دو الک نمره ۴ و نمره ۸، هر دو ماسه کوبیت و هیدروکن دارای یک وزن از سنگدانه هستند. اما همین سنگدانه‌ها به علت نوع خردایش، در ماسه کوبیت (مربوط به طرح ۱) ریزتر از ماسه هیدروکن (مربوط به طرح ۲) می‌باشند.

۳-۳. نسبت استحکام مارشال

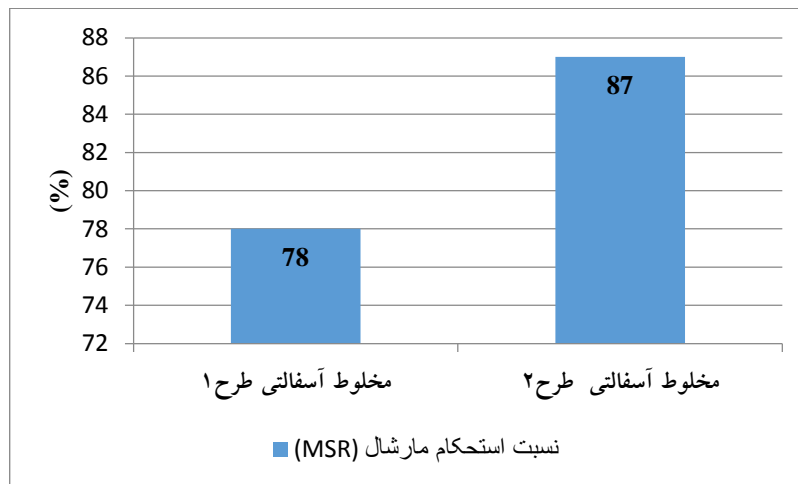
نتایج مربوط به استحکام مارشال نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲، در شکل ۷ و نسبت استحکام هر دو مخلوط آسفالتی در شکل ۸ نشان داده شده است. شایان ذکر است که براساس آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، نسبت استحکام مارشال (MSR) نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد.

با توجه به نتایج قابل مشاهده در نمودارهای مارشال برای هر دو طرح، طرح ۲ به دلیل شکستگی مناسب‌تر مصالح سنگی ۶-۰ میلی‌متر و ضریب گوشه‌داری مناسب‌تر، دارای درصد فضای خالی مصالح سنگی بیشتری بوده که این مهم تأثیر زیادی در درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی دارد. درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی نیز بر وزن مخصوص حقیقی مخلوط مترکم تأثیر می‌گذارد. با افزایش وزن مخصوص، مقاومت و استحکام مخلوط آسفالتی بیشتر شده و همچنین مقدار فضای خالی مخلوط آسفالتی مترکم کاهش می‌یابد و به همین دلیل، مقدار قیر بهینه (متناظر با ۴ درصد فضای خالی) مخلوط آسفالتی طرح ۲ کمتر بوده است. بنابراین، مخلوط آسفالت در طرح ۲، با توجه به ضریب گوشه‌داری و پارامترهای مارشال، علی‌رغم قیر بهینه کمتر، شرایط فنی بهتری دارد.

همچنین، هر چقدر مصالح سنگی پولکی‌تر و ریزتر باشد، ضریب گوشه‌داری کمتر و مساحت سطح کلی بیشتری را دارا بوده که مستعد جذب قیر بیشتر مصالح سنگی و همچنین درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA) بیشتر می‌باشد که باعث کاهش قیر مؤثر مخلوط آسفالتی می‌گردد. همانگونه که مشخص است، مخلوط آسفالت مربوط به طرح ۱ به علت شکستگی نامناسب و ریزتر مصالح سنگی ۶-۰ میلی‌متر و ضریب گوشه‌داری



شکل ۷. نتایج آزمایش استحکام مارشال در حالت خشک و اشباع برای هر دو مخلوط آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲



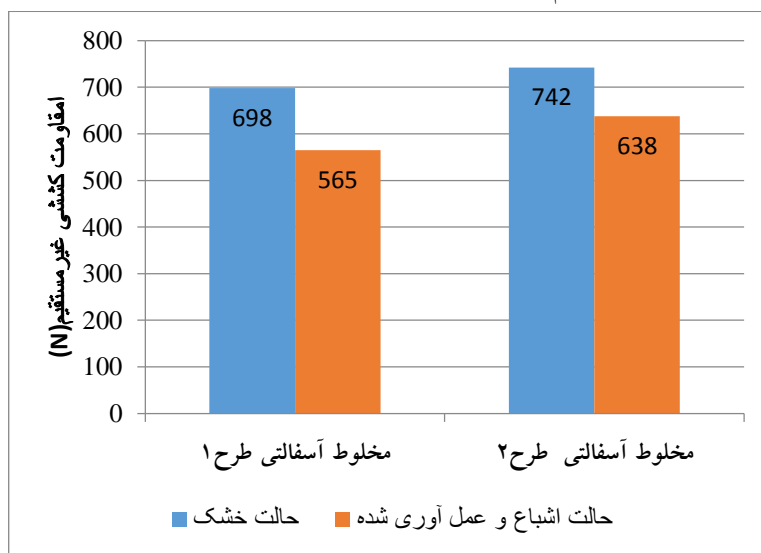
شکل ۸. نتایج آزمایش استحکام مارشال و نسبت استحکام برای هر دو مخلوط آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲

نمونه‌های هر دو مخلوط آسفالتی قابل قبول می‌باشد.

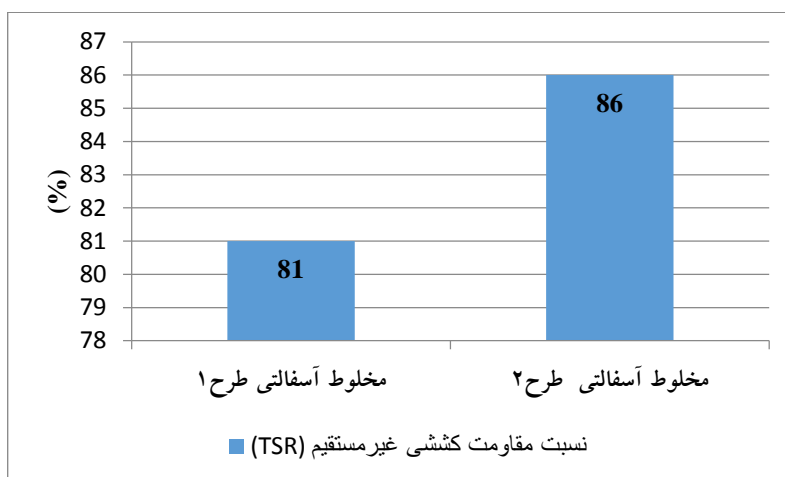
۳-۴. آزمایش حساسیت رطوبتی (کشش غیرمستقیم)

نتایج مربوط به آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد AASHTO T-283 در شکل ۹ و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل ۱۰ برای هر دو مخلوط آسفالتی نشان داده شده است.

استحکام مارشال در هر دو حالت خشک و اشباع مربوط به طرح ۲ بیشتر است که نشان از مقاومت و دوام بهتر این مخلوط آسفالتی دارد. به عبارت دیگر، در شرایطی که استحکام مارشال نمونه خشک طرح ۲ از طرح ۱ بیشتر می‌باشد، استحکام همین نمونه مخلوط آسفالت طرح ۲، پس از غوطه‌وری و اشباع ۲۴ ساعته، ۱۳ درصد کاهش مقاومت داشته است. در صورتی که استحکام مارشال نمونه خشک مخلوط آسفالت طرح ۱ پس از غوطه‌وری و اشباع ۲۴ ساعته، ۲۲ درصد کاهش یافته است. با این حال، نسبت استحکام مارشال در



شکل ۹. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای هر دو مخلوط آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲



شکل ۱۰. نسبت TSR برای هر دو مخلوط آسفالتی طرح ۱ و طرح ۲

نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های هر دو مخلوط آسفالتی قابل قبول می‌باشد.

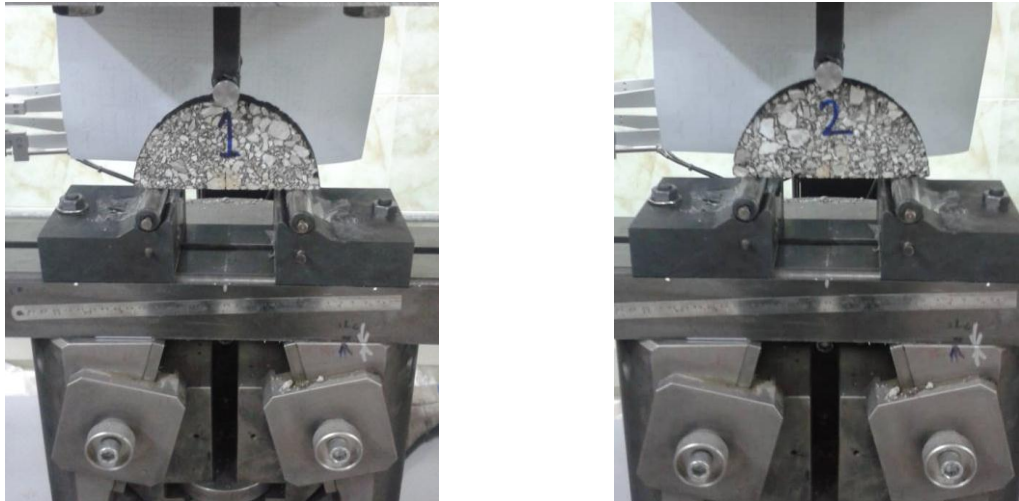
همانگونه که در بخش مربوط به ضریب گوشه‌داری بیان گردید، به سبب بیشتر بودن قیر مؤثر در مخلوط آسفالت تهیه شده با ماسه هیدروکن (طرح ۲)، پیوند بین قیر و سنگدانه بیشتر و بهتر بوده که سبب مقاومت بیشتر این مخلوط آسفالتی در هر دو آزمون حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی شده است.

۳-۵. تعیین مقاومت شکست در هر دو مخلوط

آسفالتی

شکل ۱۱، نحوه انجام آزمایش در موده‌های متفاوت، روی نمونه SCB مخلوط آسفالتی طرح ۱ را نشان می‌دهد.

مخلوط آسفالت طرح ۲، مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری را در هر دو حالت خشک و عمل‌آوری شده نسبت به مخلوط آسفالت طرح ۱ به دست آورده است. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مخلوط آسفالتی طرح ۲ پس از عمل-آوری و یک سیکل یخ و ذوب، ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. در صورتی که همین مقاومت در مورد نمونه‌های مخلوط آسفالت طرح ۱، پس از یک سیکل یخ و ذوب، ۱۹ درصد کاهش یافته است که نشانگر مقاومت و دوام بهتر مخلوط آسفالتی طرح ۲ در برابر زیان‌های رطوبتی می‌باشد. با این حال،



شکل ۱۱. آزمایش شکست در مودهای ۱ و ۲ متفاوت روی نمونه SCB مربوط به مخلوط آسفالتی طرح ۱

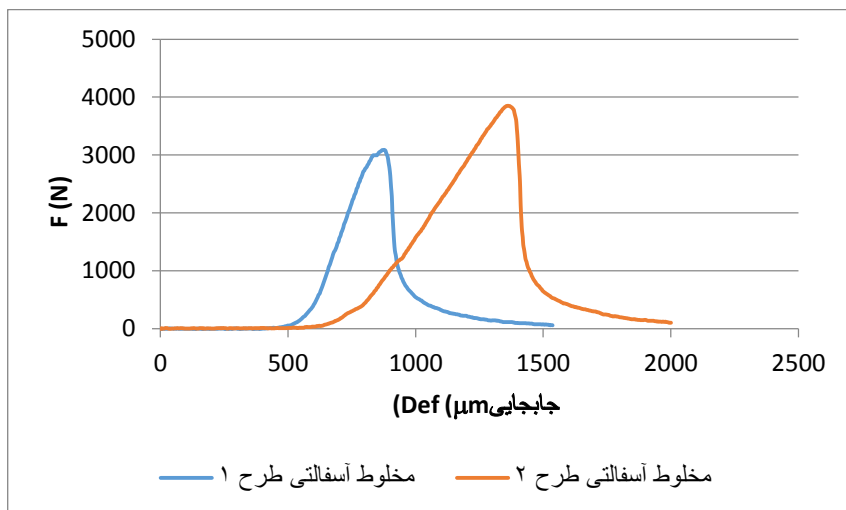
خالص (مود II) و همچنین در حالت مختلط بارگذاری (مود مختلط I و II)، در بار بحرانی بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی طرح ۱، دچار شکست شده و مقاوم‌تر می‌باشد.

مقادیر به دست آمده برای میانگین بار بحرانی، انرژی و چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌های SCB هر دو مخلوط آسفالتی در تمام مودهای بارگذاری در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط آسفالت طرح ۲، در کشش خالص (مود I)، برش

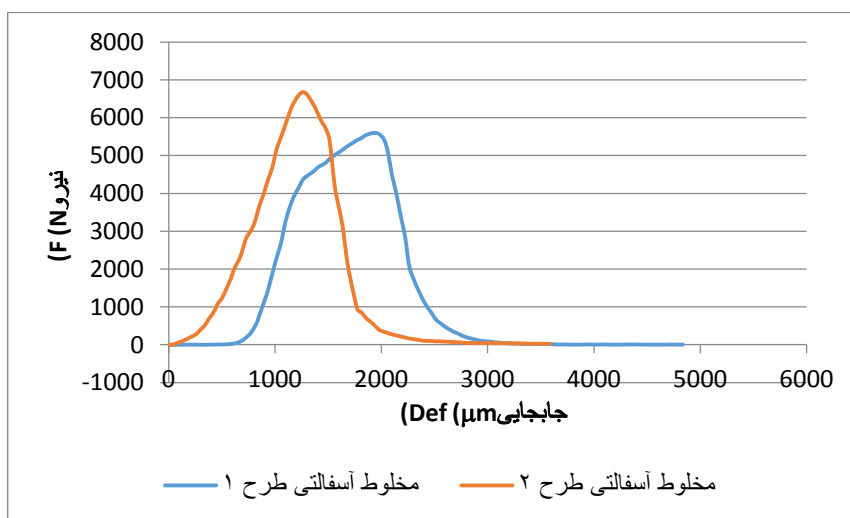
جدول ۷. مقادیر بار بحرانی شکست در مودهای مختلف شکست هر دو مخلوط آسفالتی

نمونه مخلوط آسفالتی طرح ۲			نمونه مخلوط آسفالتی طرح ۱			پارامتر
مود مختلط I / II	مود II (برش خالص)	مود I (کشش خالص)	مود مختلط I / II	مود II (برش خالص)	مود I (کشش خالص)	
۶۸۱۵	۶۵۱۳	۳۴۸۰	۶۴۶۷	۵۴۹۹	۳۲۶۸	بار بحرانی (N) Pcr
۲/۶	۳/۸	۲	۲/۳	۳/۸	۰/۶۶	انرژی کل (J/m^2)
۰/۵۴	۰/۸۷	۰/۹۵	۰/۵۱	۰/۷۳	۰/۸۹	چقرمگی شکست ($MPa\sqrt{m}$)

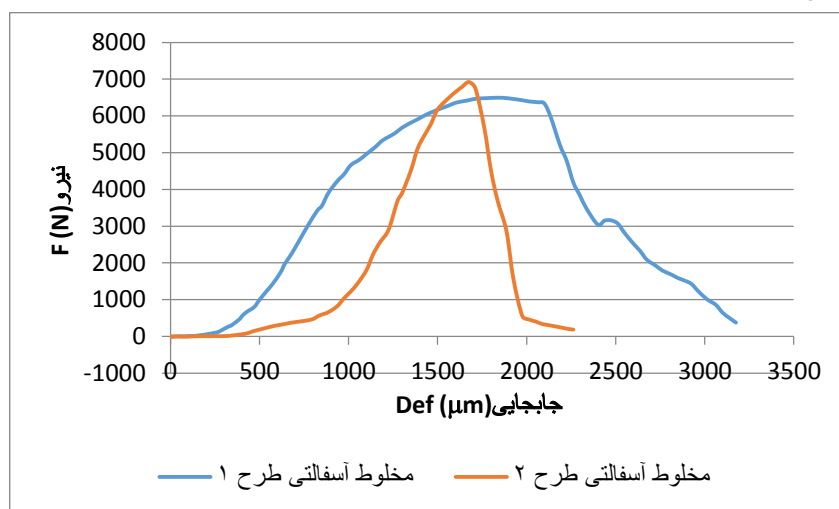
شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، منحنی بار-جابجایی را در هر سه مود مورد آزمایش برای یکی از نمونه‌های هر دو مخلوط آسفالتی نشان می‌دهند.



شکل ۱۲. منحنی مربوط به بار-جابجایی در بارگذاری مود I برای هر دو مخلوط آسفالتی



شکل ۱۳. منحنی مربوط به بار-جابجایی در بارگذاری مود II برای هر دو مخلوط آسفالتی



شکل ۱۴. منحنی مربوط به بار-جابجایی در بارگذاری مود مختلط برای هر دو مخلوط آسفالتی

سنگ‌شکن توسط دو سنگ‌شکن کویت و هیدروکن، بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالت گرم، با استفاده از آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد AASHTO T-283 و آزمایش شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نمونه‌های SCB در مودهای I، II و مود مختلط، مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. بر این اساس، نتایج زیر حاصل گردید:

- شکست نامناسب مصالح سنگی ریزدانه در سنگ‌شکن کویت و افزایش میزان ذرات پولکی-شکل باعث کاهش ۷ درصدی ضریب گوشه‌داری مصالح سنگی نسبت به ماسه تولید شده در سنگ‌شکن هیدروکن شده است که این مهم، کاهش وجوه شکسته و افزایش مساحت سطح سنگدانه‌های ریزدانه ماسه کویت را در پی خواهد داشت که باعث افزایش ۰/۱ درصدی مقدار قیر بهینه طرح ۱ نسبت به طرح ۲ می‌گردد.
- به دلیل افزایش سطح مصالح سنگی در طرح ۱، درصد قیر جذب شده به سنگدانه‌ها افزایش یافته و باعث کاهش درصد وزنی قیر مؤثر به مقدار ۱ درصد در مخلوط آسفالتی طرح ۱ می‌گردد. کاهش مقدار قیر مؤثر نیز سبب کاهش پوشش قیر دور سنگدانه‌ها شده و ضعیف بودن پیوند قیر-سنگدانه را در پی خواهد داشت که سبب تضعیف پارامترهای مرتبط با طرح اختلاط مخلوط آسفالتی طرح ۱ می‌گردد.
- مقایسه نتایج آزمایش‌های مرتبط با دوام رطوبتی و نیز نتایج آزمایش مقاومت شکست در مودهای I و II و مود مختلط، برای هر دو مخلوط آسفالت گرم طرح ۱ (تهیه شده با ماسه سنگ‌شکن کویت) و طرح ۲ (تهیه شده با ماسه سنگ‌شکن هیدروکن)، نشان می‌دهد که با افزایش ضریب گوشه‌داری و به

همچنین، با توجه به نتایج انرژی شکست، مشخص است که مخلوط آسفالت طرح ۲ در کشش خالص نیاز به انرژی بسیار بیشتری برای شکست دارد. با توجه به مقدار بار بحرانی در نمونه‌های هر دو مخلوط آسفالتی در مود I، و نیز میزان کار یا انرژی شکست متناظر این مود، شکست در مود I مربوط به نمونه‌های مخلوط آسفالتی طرح ۱، تردتر می‌باشد که این مهم به پیوند میان قیر و سنگدانه‌ها در طرح ۱ بستگی دارد.

در برش خالص، انرژی شکست هر دو مخلوط آسفالتی برابر می‌باشد که با توجه به بار بحرانی بیشتر مخلوط آسفالتی طرح ۲، در برش خالص، می‌توان نتیجه گرفت که شکست در مخلوط آسفالت طرح ۲ تردتر می‌باشد که این مهم می‌تواند به دلیل وزن مخصوص بیشتر نمونه‌های مترکم این مخلوط آسفالتی و اصطلاحاً توپرتر بودن نمونه‌های این مخلوط باشد. در شرایط واقعی، روسازی‌های آسفالتی در معرض بارهای ترکیبی و مختلط قرار دارند که در حالت بارگذاری مختلط آزمایش نیز انرژی شکست مخلوط آسفالت طرح ۲ بیشتر بوده که بیانگر مقاومت بهتر این مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی دمای کم می‌باشد.

نتایج چقرمگی شکست نیز گویای مقاومت بیشتر مخلوط آسفالتی طرح ۲، دارای ماسه تولید شده توسط سنگ‌شکن هیدروکن، می‌باشد.

در این بخش نیز اثر قیر مؤثر بیشتر در مخلوط آسفالت تهیه شده با ماسه هیدروکن (طرح ۲)، به سبب ضریب گوشه‌داری بیشتر، در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شکست در مودهای I و II و مود مختلط مشهود می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر ضریب گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه ناشی از نوع خردایش سنگدانه‌ها در کارگاه

تبع آن افزایش قیر مؤثر، دوام رطوبتی و مقاومت مخلوط آسفالت گرم افزایش می‌یابد. عملیات خردایش مصالح سنگی در کارگاه‌های سنگ‌شکن، از جمله مباحثی است که تاکنون آنچنان مورد ارزیابی و بررسی قرار نگرفته است. چنانچه از نتایج این تحقیق مشاهده می‌شود، خردایش مناسب مصالح سنگی ریزدانه جهت تولید مخلوط آسفالت گرم می‌تواند کیفیت تولید و اجرای مخلوط آسفالتی و دوام آن در برابر عوامل مختلف را تضمین نموده و با کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، باعث صرفه اقتصادی در پروژه های اجرایی گردد.

۵. مراجع

- حامدی، غ. ۱۳۸۹. "بررسی آزمایشگاهی تهیه مخلوط‌های آسفالت گرم مقاوم در برابر خرابی رطوبتی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران گرایش راه و ترابری، دانشگاه گیلان، رشت.
- حمیدی جو، ر. ۱۳۹۶. "کارگاه آسفالت". انتشارات سنجش و دانش، تهران.
- خوشفرمان برجی، م.، بهمنی، م. و صیادی، ا. ۱۳۹۲. "تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای، عملیاتی و انرژی مصرفی و بررسی میزان بهره‌وری سنگ‌شکن‌های فکی". سومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران.
- دانشگاه علم و صنعت و پژوهشکده حمل و نقل. ۱۳۹۱. "رفتار رشد ترک در آسفالت تحت بارهای ترکیبی کششی-برشی (در دمای پایین)". پژوهشکده حمل و نقل، تهران.
- روانشادنی، م. ۱۳۹۳. تأسیسات تولید مصالح سنگی در کارگاه‌های عمرانی و معدنی (سنگ‌شکن)". نشر نوآور، تهران.
- سرائی پور، م. ۱۳۷۷. "آسفالت". انتشارات دهخدا، تهران.
- سنگ‌سفیدی، ا.، سنگ‌سفیدی، م. و زیاری، ح. ۱۳۹۴. "تأثیر مصالح بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالت". نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، ۸۱: ۴۵-۵۷.
- شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک. ۱۳۸۷. "مخلوط‌های آسفالتی و قیر". دفتر پژوهش و تحقیقات علمی، تهران.
- فخری، م. و متوسطی خیری، پ. ۱۳۸۸. "ارائه یک مدل جهت بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر پدیده عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.
- کاووسی، ا. و متولی زاده، س. م. ۱۳۹۸. "تعیین مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) در دماهای کم بر پایه نتایج آزمایش SCB". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۸(۲): ۱-۱۵.
- کاووسی، ا. و نظیری زاد، م. ۱۳۹۲. "بررسی اثرات مواد ضد عریان‌شدگی در بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- محمدعلیها، م. ر. رضایی فر، م. ح. و فضائلی، ح. ۱۳۹۴. "بررسی آزمایشگاهی چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی تحت مودهای ترکیبی کششی-برشی". عمران مدرس، ۱۵(۱): ۷۳-۸۵.
- مرتضوی، ر. و بنیسی، ص. ۱۳۹۲. "ارائه روشی برای انتخاب سنگ‌شکن اولیه". نهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن ایران، دانشگاه بیرجند.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۰. "آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه شماره ۲۳۴، تجدید نظر اول.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۲. "مشخصات فنی عمومی راه". نشریه شماره ۱۰۱، تجدید نظر دوم.

واقفی. س. ع. و سرکار، ع. ۱۳۹۸. "تأثیر خصوصیات فیزیکی سنگدانه بر روی پیرشدگی بلندمدت قیر". یازدهمین همایش قیر و آسفالت ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.

AASHTO. 2007. "Standard method of test for resistance of compacted HMA to moisture-induced damage". AASHTO Designation: T-283-07.

AASHTO. 2017. "Standard method of test for uncompacted void content of fine aggregate". AASHTO Designation: T-304-17.

Asphalt Institute. 2007. "The asphalt handbook". 7th edition, Manual Series No. 4.

Asphalt Institute. 2015. "Asphalt mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types". 7th edition, Manual Series No. 2.

ASTM D1559. 1993. "Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus". ASTM International.

Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Mansour Khaki, A. and Mirabdolazimi, S. M. 2015. "Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive". *Constr. Build. Mater.*, 78: 60-68.

Burak, S. and Onsoni, A. 2014. "Effect of aggregate shape on the surface properties of flexible pavement". *J. Civ. Eng.*, 18(5): 1364-1371.

Du, J., Ren, D., Ai, C., Zhang, J. and Qiu, Y. 2021a. "Effect of aggregate gradation on crack propagation in asphalt mixtures at low temperatures based on the Eshelby equivalent inclusion theory". *Constr. Build. Mater.*, 290: 123181.

Du, J., Rahman, A., Zhou, Z., Ai, C. and Qiu, Y. 2021b. "Enhancement effect of the aggregate particles on the low-temperature cracking resistance of the asphalt mortar". *Constr. Build. Mater.*, 290: 1-12.

Im, S., Ban, H. and Kim, Y. R. 2014. "Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry". *Constr. Build. Mater.*, 52: 413-421.

Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. R., Hamed, G. H. and Azarhoosh, M. J. 2012. "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 31: 384-388.

Rismantojo, P., Haddock, J. E. and White, T. D. 2003. "Comparison of fine aggregate uncompacted voids measured by the ASTM C1252 and VTM-5 devices". *J. Test. Eval.*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

Shah, S. M. R. and Abdullah, M. E. 2010. "Effect of aggregate shape on skid resistance of compact hot mix asphalt". Second International Conference on Computer and Network Technology, Bangkok, Thailand.